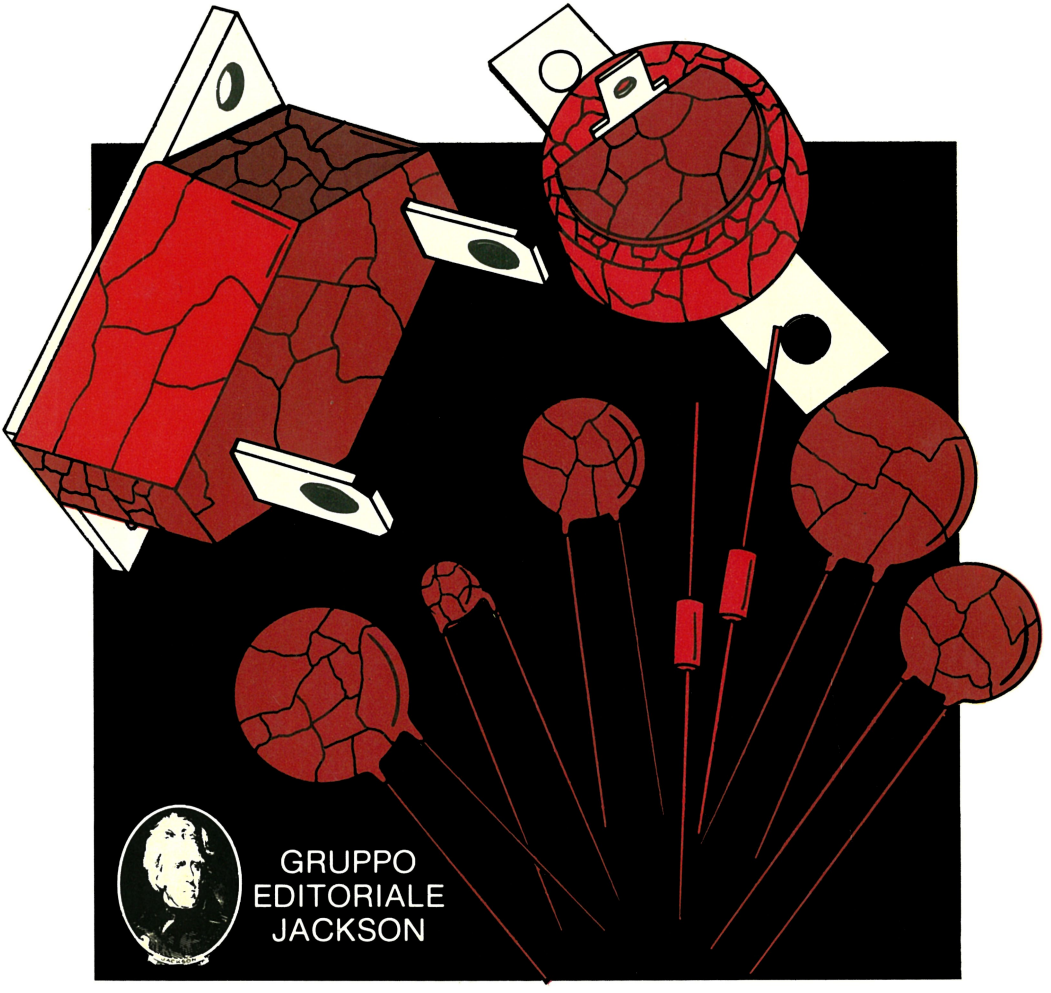
General Electric

LA SOPPRESSIONE DEI TRANSITORI DI TENSIONE



GRUPPO
EDITORIALE
JACKSON

LA SOPPRESSIONE DEI TRANSITORI DI TENSIONE

di
General Electric

GRUPPO
EDITORIALE
JACKSON
Via Rosellini, 12
20124 Milano

Gli schemi illustrati in questo manuale servono solo a chiarire delle specifiche applicazioni dei semiconduttori e non si devono intendere come informazioni costruttive. Quantunque la loro preparazione sia stata fatta con ragionevole accuratezza, per garantire la funzionalità tecnica e la precisione degli altri dati forniti, la General Electric non assume responsabilità per le conseguenze che potessero derivare dall'uso di questi schemi. Salvo esplicito assenso scritto. I prodotti a semiconduttore ed i loro impieghi qui divulgati possono essere coperti da brevetti della General Electric Company oppure di altri. La divulgazione delle informazioni contenute nel volume e la vendita dei prodotti a semiconduttore della General Electric Company non comporta la richiesta di licenza in rapporto a protezioni brevettuali che potessero coprire delle particolari combinazioni di prodotti a semiconduttore con altri componenti o prodotti. In mancanza di un'espressa convenzione scritta del contrario, la General Electric Company non assume responsabilità per violazioni di brevetti che derivino dall'uso, in qualsiasi modo avvenga, dei prodotti a semiconduttore, combinati con altri prodotti o componenti, sia da parte dell'acquirente dei prodotti a semiconduttore che da altri.

In questo manuale si fa riferimento alle relazioni della serie di informazioni tecniche (TIS). Un numero limitato di copie di queste relazioni sono prodotti presso:
General Electric Company - Technical Information Exchange Corporate Research & Development, P.O. Box 43 Building 5, Schenectady, New York 12301.

© Copyrigth per l'edizione originale General Electric Company U.S.A. 1982
© Copyright per l'edizione italiana Gruppo Editoriale Jackson s.r.l. - 1983

L'autore ringrazia per il prezioso lavoro svolto nella stesura dell'edizione italiana la signora Francesca di Fiore e l'ing. Roberto Pancaldi.

Tutti i diritti sono riservati. Stampato in Italia. Nessuna parte di questo libro può essere riprodotta, memorizzata in sistemi di archivio, o trasmessa in qualsiasi forma o mezzo, elettronico, meccanico, fotocopia, registrazione o altri senza la preventiva autorizzazione scritta dell'editore.

Stampato in Italia da:
S.p.A. Alberto Matarelli - Milano - Stabilimento Grafico

SOMMARIO

CAPITOLO 1 - I TRANSITORI DI TENSIONE - UNA PANORAMICA ... 1
1.1 I transitori ripetibili ... 1
1.2 I transitori casuali ... 6
1.3 I transitori sulle linee elettriche in corrente alternata ... 6
1.4 I transitori sulle linee di telecomunicazione ... 10
1.5 I transitori sugli automezzi ... 10
1.6 Gli effetti dei transitori di tensione ... 11
1.7 La rivelazione dei transitori ... 15
1.8 Le misure e gli standard dei transitori ... 16

CAPITOLO 2 - LA SOPPRESSIONE DEI TRANSITORI - DISPOSITIVI E TEORIA ... 37
2.1 Dispositivi per la soppressione dei transitori ... 37
2.2 Confronto tra i diversi soppressori di transitori ... 44
2.3 Controlli di funzionalità ... 47

CAPITOLO 3 - I VARISTORI GE-MOV® II - PROPRIETA' FONDAMENTALI, NOMENCLATURA E TEORIA ... 51
3.1 Che cos'é un varistor GE-MOV® II ... 51
3.2 Caratteristiche fisiche ... 53
3.3 La costruzione dei varistori ... 58
3.4 La caratterizzazione elettrica ... 61
3.5 La terminologia specifica dei varistori ... 68

CAPITOLO 4 - COME PROGETTARE CON I VARISTORI GE-MOV® II ... 75
4.1 La scelta dei varistori ... 75
4.2 Come i varistori vanno fuori uso e loro protezione ... 84
4.3 Funzionamento in serie ed in parallelo dei varistori ... 90
4.4 Applicazioni ... 93

CAPITOLO 5 - LA SOPPRESSIONE DEI TRANSITORI - NEI SISTEMI DI TELECOMUNICAZIONE ... 117
5.1 Introduzione ... 117
5.2 I transitori originati nel sistema ... 117
5.3 Le scariche elettriche atmosferiche, transitori indotti ... 118
5.4 Calcolo dei transitori sui cavi ... 120
5.5 I sistemi di potenza, transitori indottti ... 123
5.6 Sistemi di protezione: i soppressori di transitori di tensione ... 124
5.7 I transitori dovuti alle linee di alimentazione ... 126
5.8 La protezione dei contatti dei relé ... 126

CAPITOLO 6 - LA SOPPRESSIONE DEI TRANSITORI SUGLI AUTOVEICOLI 127
6.1 Transitori dovuti all'ambiente 127
6.2 Applicazioni dei varistori 128

CAPITOLO 7 - PROVE SUI VARISTORI 137
7.1 Introduzione 137
7.2 Scopi delle prove 137
7.3 Misura delle caratteristiche dei varistori[1] 140
7.4 Prove di conferma delle prestazioni dei varistori 149
7.5 Prove meccaniche ed ambientali sui varistori 152
7.6 La strumentazione per la prova elettrica dei varistori 153
7.7 Onde di prova e standard 154

CAPITOLO 8 - L'AFFIDABILITA' DEI VARISTORI 161
8.1 Introduzione 161
8.2 Affidabilità con polarizzazione in tensione alternata 162
8.3 Affidabilità con polarizzazione in continua 165
8.4 Comportamento di fronte all'energia impulsiva 169
8.5 Affidabilità ed integrità meccanica 174
8.6 Affidabilità ambientale e magazzinaggio 176
8.7 Sicurezza 178

CAPITOLO 9 - CARATTERISTICHE TECNICHE DEI VARISTORI AD OSSIDO METALLICO GE-MOV®II 179
Introduzione 179
Come scegliere un varistor GE-MOV®II 186
Prestazioni e caratteristiche 189
Alta affidabilità 195
Caratteristiche V-I al transitorio 197
Prestazioni di durata con sollecitazioni impulsivie 202
Forme e dimensioni 209
Il montaggio della serie P 213
Sigle speciali dei prodotti 214

INTRODUZIONE

La General Electric, una delle massime ditte produttrici di apparecchiature elettriche negli Stati Uniti, ha effettuato ricerche pluriennali sulle cause, sugli effetti e sulla frequenza dei sovraccarichi in tensione derivanti dai disturbi atmosferici o da altre cause. Molti collaboratori del centro di ricerca e sviluppo della General Electric sono riconosciuti in ogni parte del mondo come esperti in questo campo. Il fabbisogno di esperienza su questo argomento è divenuto sempre più critico, con l'estensione delle applicazioni dei dispositivi a stato solido nei prodotti industriali ed anche nei prodotti civili.

I circuiti elettromeccanici e quelli facenti uso di tubi a vuoto erano meno soggetti a danneggiamenti dovuti a transitori di alta tensione, e quindi c'era una minore necessità di componenti di protezione dalle sovratensioni molto alte. Con l'aumento dell'impiego dei controlli a stato solido, la necessità di protezione contro i sovraccarichi è diventata sempre più rigorosa. I metodi di soppressione tradizionali divennero in molti casi inadeguati, e si dovettero trovare dei metodi nuovi. Una delle soluzioni fu una nuova resistenza ceramica a caratteristica non lineare, generalmente conosciuta come varistor ad ossido metallico ZnO. Il reparto prodotti semiconduttori della General Electric ha presentato il varistor ad ossido metallico GE - MOV® nel 1972, e questo componente è stato subito ben accolto, appariva a portata di mano la soluzione della maggior parte dei problemi di soppressione dei transitori di tensione. Il componente era veloce (tempo di risposta dell'ordine dei nanosecondi) , compatto (diametro tipico 07-20 mm, spessore 1-3 mm), aveva una grande capacità di assorbimento di energia (fino a 200 J, 6000 A di sovraccarico) ed era più economico di altri dispositivi usati per lo stesso scopo.

A partire dal 1972, la General Electric ha migliorato la tecnologia della sopressione dei transitori, migliorando le prestazioni del varistor, ed ha condotto in continuazione vaste ricerche sulle cause e sugli effetti delle tensioni transitorie. Il miglioramento del prodotto è avvenuto mediante l'uso di migliori materiali ceramici e con l'introduzione dei nuovi incapsulamenti GE - MOV® atti a soddisfare le richieste dell'industria. Il più recente miglioramento del prodotto, introdotto dal Reparto Prodotti Semiconduttori, si ha con la presentazione del varistor GE - MOV® II. Questo componente è un varistor ad ossido metallico perfezionato, con capacità energetica notevolmente maggiore rispetto al prodotto originale. Ora per lo stesso prezzo ed alle stesse dimensioni esterne, la garanzia di protezione, è maggiore rispetto a qualsiasi altro prodotto precedente.

Per completare la presentazione dei varistori ad ossido metallico GE-MOV® II, la General Electric ha compilato questa *terza edizione del manuale della soppressione*

dei transitori di tensione completamente riveduta. Si dimostra così che la General Electric vuol continuare ad essere su posizioni di punta mondiali nella comprensione delle cause di malfunzionamento e di danneggiamento degli impianti e delle apparecchiature, e nella proposta dei sistemi di prevenzione.

Abbiamo fiducia che troverete molto utile questo manuale nella determinazione delle necessità di soppressione nei vostri prodotti. La General Electric mette a disposizione una vasta gamma di dispositivi di protezione, che vanno dal piccolo elemento con incapsulamento assiale che sopporta meno di 2 J e 100 A, fino al tipo ad alta energia che può sopportare 6500 J e 50.000 A. Con questa vasta offerta di prodotti, possiamo garantire la soluzione della maggior parte dei problemi riguardanti i transitori di tensione. I nostri varistori ad ossido metallico GE-MOV® II sono a vostra disposizione presso i rivenditori autorizzati di prodotti elettronici, sia negli Stati Uniti che nel resto del mondo.

CAPITOLO 1

I TRANSITORI DI TENSIONE UNA PANORAMICA

Perché un qualsiasi problema possa essere trattato, occorre prima stabilirne lo scopo. Questo capitolo costituisce una panoramica sulle origini e sulla natura delle sovratensioni transitorie, sui problemi che ne derivano e sugli strumenti necessari per controllarle ed evidenziarle.

I transitori nei circuiti elettrici traggono origine dall'erogazione istantanea di una quantità di energia immagazzinata in precedenza. Questa energia può essere accumulata entro il circuito e rilasciata mediante una commutazione volontaria o controllata. Essa può essere anche accumulata al di fuori del circuito e può essere iniettata od indotta in questo per una causa che sfugge al controllo del progettista del circuito. I transitori possono avere un ritmo ripetitivo oppure un andamento impulsivo casuale. I transitori ripetitivi, come i picchi di tensione che avvengono durante le commutazioni, l'interruzione di carichi induttivi, eccetera, si possono osservare con molta facilità. Non altrettanto avviene con i transitori casuali. Essi avvengono in momenti imprevedibili, derivano da sorgenti distanti e richiedono apparecchiature di avviso per rilevare la loro evenienza. In pratica, un corollario direttamente derivato dalla legge di Murphy stabilisce che il miglior soppressore di transitori è un rivelatore di transitori! Si è però accumulata una sufficiente esperienza per poter dare delle ragionevoli indicazioni sugli ambienti disturbanti nei circuiti di potenza a bassa tensione in alternata[1,2], nelle apparecchiature di telecomunicazione[3], e negli impianti elettrici degli autoveicoli[4].

Un'efficace protezione contro le sovratensioni transitorie richiede la dissipazione dell'energia posseduta dall'impulso ad una tensione sufficientemente bassa da assicurare la sopravvivenza dei componenti del circuito. I paragrafi successivi chiariranno nei particolari le due categorie di transitori, il modo in cui essi vengono prodotti, i loro effetti ed il modo di rilevarli.

1.1 I TRANSITORI RIPETITIVI

Un repentino cambiamento nelle condizioni elettriche di qualsiasi circuito provocherà una tensione transitoria generata dall'energia accumulata nell'induttanza e nella capacità del circuito. Una variazione della corrente (di/dt) che avvenga in un'induttanza (L) genererà una tensione pari ad L di/dt, e la polarità di questa

tensione sarà tale da favorire un ulteriore passaggio di corrente nella precedente direzione.

Questo effetto è responsabile della maggior parte dei transitori di tensione derivati dalle commutazioni. Questi transitori si manifestano come picchi di commutazione nei circuiti di conversione di potenza, quando si interrompono carichi ed in caso di guasti. L'effetto dura poco, in quanto la sorgente ha una capacità limitata all'energia immagazzinata nell'induttanza ($1/2\ Li^2$), e viene in genere dissipata ad un'elevata potenza istantanea (Energia = potenza x tempo). Però il semplice effetto dovuto ad un'operazione di commutazione può essere ripetuto parecchie volte durante una sequenza di manovra (si pensi alla formazione di archi nell'intervallo tra i contatti di un interruttore), per cui gli effetti cumulativi potranno essere notevoli.

1.1.1 L'alimentazione del primario di un trasformatore

Quando un trasformatore riceve corrente durante il picco della tensione di alimentazione, l'accoppiamento di questo valore della tensione alla capacità distribuita ed all'induttanza dell'avvolgimento secondario può generare un transitorio in forma di oscillazione con ampiezza di picco che arriva al doppio della tensione di picco normale al secondario.
Le successive oscillazioni dipendono dai parametri L e C del circuito. Un altro punto importante da ricordare è che la sezione secondaria fa parte di un circuito partitore capacitivo disposto in serie alla capacità tra le spire del trasformatore (C_s). Questo picco di tensione accoppiato capacitivamente non ha una relazione diretta con il rapporto spire del trasformatore, e quindi non si potrà ritenere che il secondario possa "vedere" il picco di tensione applicato al primario.

1.1.2 Interruzione dell'alimentazione al primario di un trasformatore

L'apertura del circuito primario di un trasformatore genera transitori di tensione elevatissimi, specialmente se al trasformatore è applicato un carico di alta impeden-

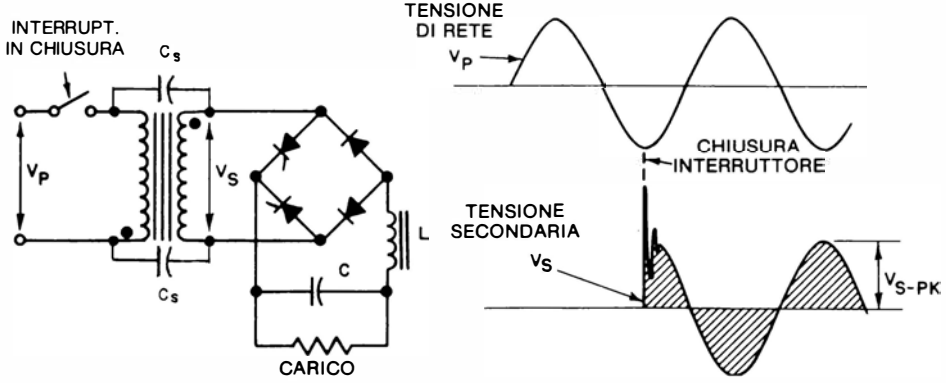


Figura 1.1 - Transitorio di tensione provocato dando corrente al primario di un trasformatore.

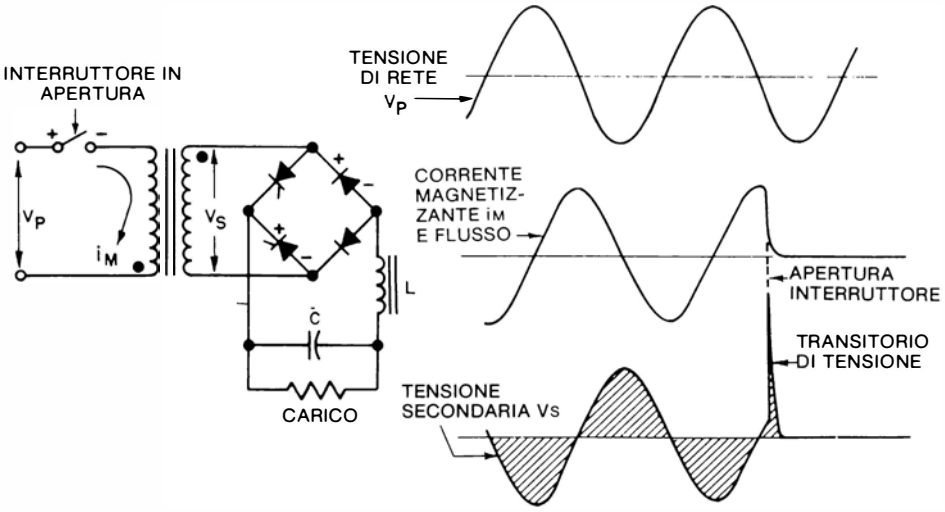


Figura 1.2 - Transitorio di tensione originato dall'interruzione della corrente magnetizzante di un trasformatore.

za. Quando si verificano questi tipi di interruzione ai capi di semiconduttori di potenza sono stati osservati dei picchi superiori a dieci volte la tensione normale.

L'interruzione della corrente magnetizzante nel trasformatore ed il conseguente collasso del flusso magnetico nel nucleo, inducono un elevato transitorio di tensione nell'avvolgimento secondario del trasformatore, come si vede in Figura 1.2.

Se non si provvede a sistemare un percorso di scarica a bassa impedenza questa raffica di impulsi di energia transitoria si presenterà ai capi del carico. Se questo è un semiconduttore oppure un condensatore con limitata tensione di isolamento, potrà andare distrutto. I transitori prodotti interrompendo la corrente magnetizzante sono di solito piuttosto importanti. Per esempio, l'energia immagazzinata nel campo magnetizzante di un trasformatore da 150 kVA può essere di 9 J.

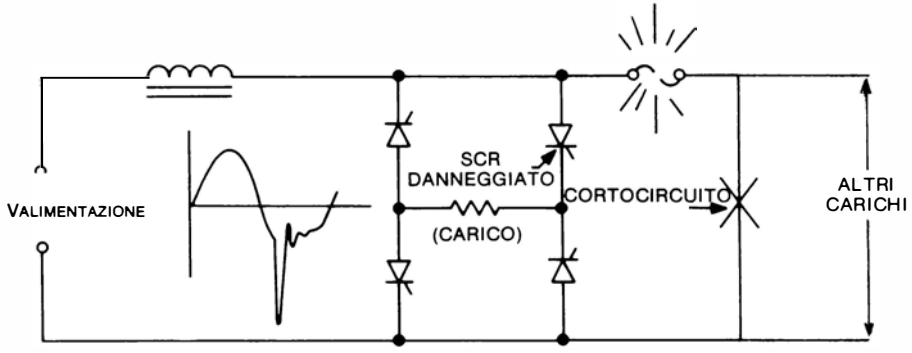


Figura 1.3 - Transitorio di tensione provocato dalla bruciatura di un fusibile per guasto sulla rete.

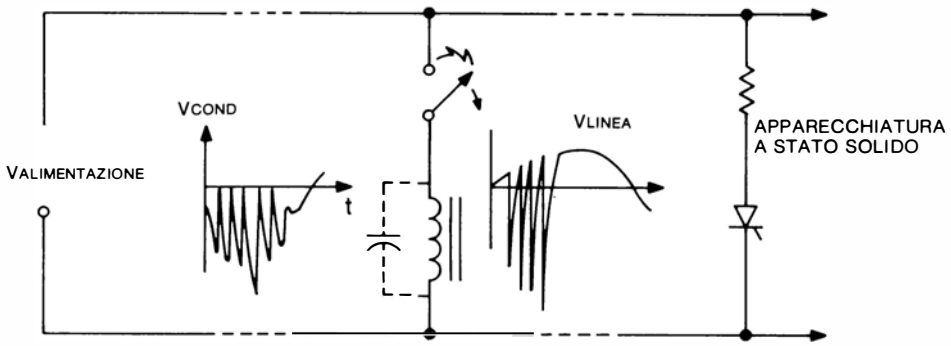


Figura 1.4 - Transitori di tensione provocati da archi sui contatti.

1.1.3 Guasti dovuti ad alimentazione di tipo induttivo

Se in un qualunque sistema di potenza si verifica un corto circuito potranno essere distrutti dei componenti disposti in parallelo al carico nel momento di interruzione del fusibile.

Quando il fusibile od il circuito di protezione di Figura 1.3 si interrompe, si ha l'interruzione della corrente di guasto, è ciò provoca l'insorgere di un'elevata tensione (L di/dt), di un'alta energia ($1/2\ L\ i^2$) entrambe di carattere transitorio, ai capi di ogni componente disposto in parallelo: tali transitori sono dovuti alla debole induttanza dell'alimentatore. Un simile effetto è prodotto anche dalla rapida interruzione di un carico ad elevata corrente.

1.1.4. Archi di interruzione

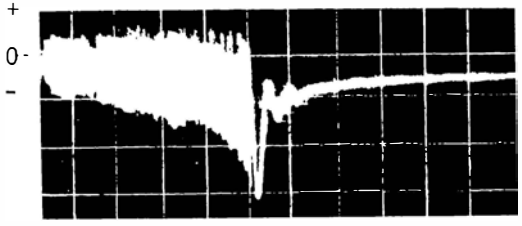
Quando si interrompe, mediante un interruttore, la corrente che passa in un circuito induttivo, come la bobina di un relé od un reattore di filtro, l'induttanza tende a mantenere la sua corrente caricando la capacità parassita. Una tale situazione si può anche avere durante una sequenza di chiusura quando i contatti rimbalzano dopo la chiusura iniziale. L'elevata corrente iniziale di carica oscillerà ad alta frequenza nell'induttanza e nella capacità. Quando la tensione ai contatti aumenta è possibile una perforazione dell'interspazio, dato che all'inizio del movimento di apertura dei contatti, la distanza tra questi è molto piccola. L'arco di contatto si interromperà al momento del passaggio per lo zero dell'oscillazione, ma si ristabilirà quando la tensione tra i contatti tornerà a crescere. Man mano che i contatti si allontanano, ogni ripresa dell'arco avverrà a tensioni sempre maggiori fino a quando i contatti riusciranno finalmente ad interrompere la corrente.

L'effetto di ripresa dell'arco e di aumento della sua tensione risulta particolar-

mente visibile in Figura 1.5 dove viene mostrato l'effetto di interruzione di una bobina di relé da 1 H con una capacità parassita nell'avvolgimento di circa 0,001 μF. A partire da una corrente continua iniziale di 100 mA il circuito produce centinaia di scariche (dalle quali viene formata la striscia "bianca" dell'oscillogramma) che si ripetono molto velocemente fino all'interruzione del circuito, ma non prima di aver raggiunto un picco di 3 kV rispetto ai 125 V iniziali presenti nel circuito.

I contatti elettromeccanici generano dei transitori ai quali riescono in genere a sopravvivere. Però nell'esempio appena trattato, la sequenza di scariche dalla durata di 2,5 ms e la corrente piuttosto elevata potranno portare ad un danneggiamento dei contatti. Inoltre i transitori introdotti nel sistema di alimentazione durante le scariche potranno danneggiare anche gli altri carichi collegati.

Ci sono ottimi motivi per tentare di eliminare gli interruttori elettromeccanici con tutti i loro problemi di archi usando dei dispositivi di commutazione a semiconduttore! Se però tali componenti sono applicati senza criterio in circuiti induttivi, l'ottima efficacia dell'interruzione può portare l'interruttore a stato solido a "commettere suicidio" generando dei transitori particolarmente elevati.



ORIZZONTALE-t, 500 μs/div.
VERTICALE-V, 1.0 k V/div.

Figura 1.5 - Aumento progressivo della tensione durante le scariche ripetitive.

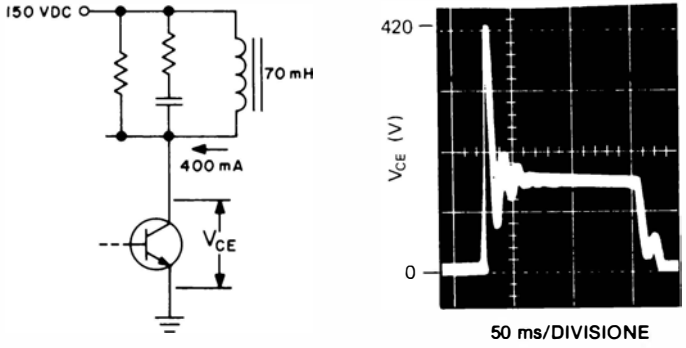


Figura 1.6 - Transitorio su transistor in commutazione.

Nell'esempio di Figura 1.6, il transistor usato per commutare 400 mA in un solenoide da 70 mH è esposto a picchi che arrivano a 400 V, quantunque la tensione nel circuito sia di soli 150 V.

Ogni volta che se ne presenti la possibilità, si deve esaminare un circuito come se fosse una sorgente potenziale di sovratensioni transitorie, in modo da poterle eliminare all'origine, in quanto un solo generatore potrebbe influenzare molti componenti. Se le sorgenti sono parecchie (oppure non è possibile identificarle) ed i componenti sensibili sono pochi, potrà essere più ragionevole applicare la soppressione ai componenti.

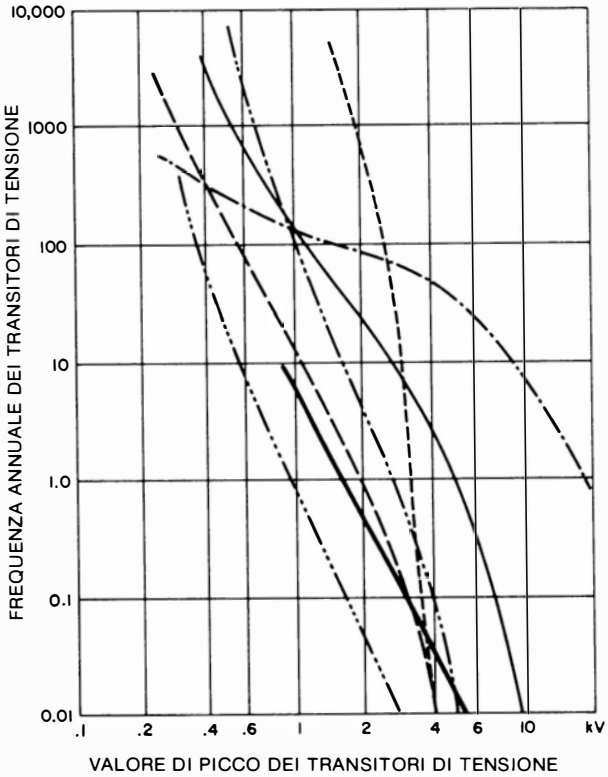
1.2 TRANSITORI CASUALI

Spesso insorgono dei problemi di transitori dovuti all'alimentatore del circuito. Questi fenomeni creano le maggiori preoccupazioni in quanto risulta difficoltoso definirne l'ampiezza, la durata ed il contenuto energetico. I transitori hanno in generale la loro origine nella commutazione di carichi disposti in parallelo sulla stessa diramazione di un sistema di distribuzione, ma essi possono anche essere causati da scariche atmosferiche (fulmini). Le linee di comunicazione, come i sistemi telefonici o di allarme, sono anch'esse soggette a guasti dovuti a fulmini oppure all'alimentazione.

Per poter lavorare sull'argomento dei transitori casuali è stato usato un sistema statistico per identificare la natura delle sovratensioni sulla linea. Anche facendo una registrazione dei transitori, non si potrà stabilire che in un sistema di determinate caratteristiche esiste una probabilità "X" di incontrare un transitorio di ampiezza. "Y". Quindi ci si limita a prender atto di una situazione "media", stando però bene accorti circa l'evenienza di ampie deviazioni rispetto a questa media, come conseguenza delle caratteristiche di un dato sistema. Nei paragrafi seguenti descriveremo l'esperienza registrata riguardante tre diversi tipi di sistema. Si tratta di: 1) linee di potenza in alternata (tensione inferiore a 600 V); 2) sistemi di telecomunicazione; 3) sistemi montati su autoveicoli. La condizione ambientale più fastidiosa, come la NEMP (Nuclear Eletromagnetic pulse = Impulsi elettromagnetici nucleari) è stata volutamente trascurata in questa discussione in quanto è già oggetto di studi specializzati da parte di un limitato gruppo di ricercatori.

1.3 I TRANSITORI SULLE LINEE ELETTRICHE IN ALTERNATA

I dati raccolti da varie fonti hanno fornito gli elementi basilari di questa trattazione dei fenomeni transitori di sovratensione.[1,5,6,7,8]. (riferimento 1, "La compilazione di una guida delle sovratensioni transitorie negli impianti elettrici di distribuzione a bassa tensione, in c.a." è ristampata al completo alla fine di questo capitolo, con il permesso della IEEE).



- - - - - - Entrata di servizio in edificio bancario a Basilea, Svizzera.

——— Entrata di servizio in palazzo per 16 famiglie, sistema interrato (stazione di testa).

— · — Fattoria agricola alimentata da linea di trasmissione aerea.

— · · — Impianto Landis & Gyr, Zugo, prese di corrente in laboratorio.

— — — Palazzo di 16 famiglie, prese nelle stanze di abitazione dei piani superiori.

— · · · — Landis & Gyr, Zugo, prese di corrente nel locale forni.

(Per gentile concessione di L. Regez, Landis & Gyr, Zugo, Svizzera)

} Servizio a (220V)

——— Curva composta riferita agli Stati Uniti — Servizio a (120V)

Figura 1.7 - Frequenza di apparizione delle sovratensioni transitorie nei sistemi di distribuzione a 220 V ed a 120 V.

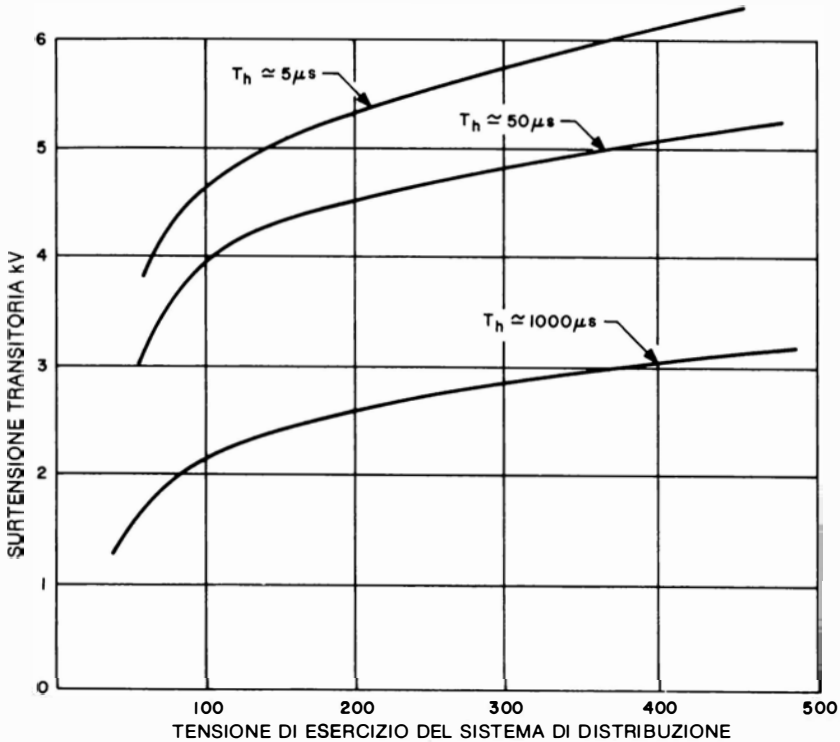


Figura 1.8 - Transitori di tensione di commutazione, in funzione della tensione del sistema, per tre valori di coda del transitorio (tempo di dimezzamento dell'ampiezza)
(dati ottenuti per gentile concessione di L. Regez, Landis & Gyr Zugo, Svizzera).

1.3.1 Ampiezza e frequenza dell'evento

L'ampiezza che si vede sulle registrazioni dei transitori copre i valori che iniziano dalle tensioni non pericolose, appena superiori a quella normale, per arrivare a parecchi kilovolt. Per le linee in alternata a 120 V il limite superiore è tra 6 ed 8 kV, tensioni alle quali si ha la scarica attraverso la normale distanza che separa i conduttori. Per ironia della sorte, migliorando la disposizione della linea si aumenta la tensione di scarica, e quindi si ammettono nel sistema transitori più elevati. Studi effettuati sulla frequenza degli eventi e sulla loro ampiezza, concordano su di un limite superiore e su di una frequenza *relativa* degli eventi. In Figura 1.7 si vede un grafico della frequenza in funzione dell'ampiezza. L'esperienza indica che dispositivi che abbiano la possibilità di sopportare meno di 2 kV avranno vita utile breve in un ambiente non protetto. Un progetto improntato alla prudenza tenderà all'isolamento a 3 kV. Quando poi la sicurezza è della massima importanza, un progetto a 6 kV resisterà anche alle massime sollecitazioni, rare ma non impossibili.

Per sistemi a tensioni superiori (220/240 V, 480 V) dati in numero limitato

esistono per Sistemi USA. Le curve di Figura 1.7 indicano però che le differenze tra le due classi, quella a 120 V e quella a 220 V, sono inferiori alle differenze che si verificano all'interno di ciascuna classe[8]. Si può quindi concludere che l'ampiezza del transitorio dipende maggiormente dalla quantità di energia che viene introdotta dall'esterno e dall'impedenza del sistema, piuttosto che dalla tensione alla quale il sistema funziona.

Per i transitori dovuti a commutazioni interne al sistema, la Figura 1.8 mostra la relazione (calcolata o misurata) tra la tensione di funzionamento del sistema ed i picchi dei transitori[8]. Risulta chiaro che l'aumento della tensione non è in rapporto lineare con l'aumento della tensione del sistema.

Qualche idea dell'incertezza che circonda il livello di transitorio previsto si può trovare nella pratica industriale della scelta delle prestazioni dei semiconduttori. Molti utenti industriali di semiconduttori di potenza scelgono componenti con tensioni che vanno da 2,0 a 2,5 volte la normale tensione di picco applicata, provvedendo anche ad una rudimentale soppressione dei transitori, al fine di assicurare l'affidabilità nei tempi lunghi. Se questo rapporto sia o meno realisticamente connesso agli effettivi livelli dei transitori è ancora un fatto opinabile; il fattore di sicurezza va scelto senza tener conto della pratica personale. Mentre è pericoloso ragionare in base di esperienze riuscite, ci sono molti casi nei quali questo procedere a lume di naso non è sufficiente, e quindi è giustificato l'uso di un calcolo più esatto. Un'altra obiezione all'uso indiscriminato dei sistemi empirici è di carattere economico. La specifica che la tensione deve essere 2,5 volte maggiore della tensione del sistema origina una forte penalizzazione per quanto riguarda il prezzo dei componenti. Di solito non è realistico è non è economico prescrivere dei semiconduttori che debbano resistere ai transitori in assenza di protezioni. La situazione ottimale è una combinazione tra elementi di protezione contro i transitori che abbiano un basso prezzo e componenti a semiconduttore di minore prestazioni in tensione, che risulteranno anch'essi di basso costo.

1.3.2 Durata, forma dell'onda ed impedenza del generatore

C'é scarsità di dati definitivi circa la durata, la forma d'onda e l'impedenza di generatore delle sovratensioni transitorie nelle reti di potenza in corrente alternata. Questi tre parametri sono importanti per la previsione dell'energia che il transitorio potrà trasferire ad un soppressore. È opportuno poter disporre di un mezzo di simulazione dell'ambiente che operi mediante un modello dell'impulso di sovratensione transitoria. Si è suggerito l'uso di impulsi unificati che all'origine sono stati sviluppati per altre applicazioni. Per esempio, è stato proposto il classico impulso in tensione unidirezionale da 1,2 x 50 μs standardizzato per i sistemi ad alta tensione[9]. Un altro suggerimento è quello di usare il treno di oscillazioni ripetitivo da 1,5 MHz ("SWC" Surge Withstand Capability) previsto per i sistemi a bassa tensione e di controllo esposti ai transitori indotti dalle interruzioni ad alta tensione e provocati dai commutatori dei servizi ausiliari di cantiere[10].

I gruppi di lavoro della IEEE e della Commissione Elettrotecnica Internazionale hanno messo a punto delle norme di unificazione riguardanti le onde di prova e le definizioni dell'impedenza di generatore. Questi sforzi tendono a staccarsi dal concetto che si debbano *imitare* le condizioni ambientali e muovono verso un concetto di una o più onde standard definite *arbitrariamente*. Il fatto si giustifica perché le apparecchiature sviluppate per soddisfare a questi standard hanno avuto una soddisfacente sperimentazione pratica e forniscono una relativa unificazione alla quale possono essere confrontati i diversi livelli di protezione. Una condizione per l'accettazione di queste onde normalizzate è che esse possono essere agevolmente riprodotte in laboratorio.[11] Questa è l'idea base del concetto TCL (Transient Control Level = livello di controllo dei transitori) il quale è stato normalmente proposto agli utenti ed ai fabbricanti dell'industria elettronica. L'accettazione di questo concetto estenderà le possibilità di prova e di valutazione dell'affidabilità dei componenti e dei sistemi ad un costo ragionevole.

1.4 I TRANSITORI NELLE LINEE DI TELECOMUNICAZIONE

Le sovratensioni transitorie che avvengono nelle linee telefoniche hanno di solito origine da due principali sorgenti: le scariche atmosferiche e le linee elettriche a 50/60 Hz. Le sovratensioni dovute al fulmine possono essere originate da una scarica che colpisce il conduttore di un sistema a filo aperto oppure lo schermo di un cavo telefonico. La maggior parte delle moderne linee telefoniche è disposta in cavi schermati. Quando nello schermo del cavo passa una corrente dovuta al fulmine oppure ad altre cause, tra i conduttori interni e lo schermo stesso vengono indotte delle tensioni.[12] Le ampiezze delle tensioni indotte dipendono dalla resistenza del materiale di schermatura, dalle interruzioni nella sua continuità dovute a fattori costruttivi, dalle caratteristiche dielettriche e dall'impedenza caratteristica del cavo.

È stata raccolta una quantità limitata di dati riguardanti le tensioni dovute a scariche atmosferiche sui cavi telefonici e questa limitazione è dovuta alla difficoltà di ottenere tali dati senza interferire con il funzionamento del sistema.[13] Le protezioni a blocchi di grafite od a scaricatore attualmente usate hanno inoltre fornito un'adeguata protezione per la maggior parte delle installazioni che facciano uso di componenti elettromeccanici.

La contiguità tra i cavi telefonici e le reti elettriche di distribuzione, che spesso hanno in comune il palo di sostegno oppure i fili di terra, è una sorgente di sovratensioni transitorie nei sistemi telefonici. Queste tensioni eccessive possono avere origine nel contatto fisico con fili caduti, nell'induzione elettromagnetica e nel potenziale di terra. Il Capitolo 5 di questo manuale contiene una discussione dettagliata dei transitori indotti dai fulmini o dalle reti elettriche di distribuzione.

1.5 I TRANSITORI SUGLI AUTOMEZZI

In un'automobile si incontrano quattro tipi principali di transitori di tensione. Si

tratta di disturbi provocati dalla diminuzione del campo dell'alternatore dovuta al "distacco del carico", dalle commutazioni induttive e dal reciproco accoppiamento.[4] In alcune regioni si possono anche avere degli "avviamenti volanti" con batterie a 24 V in caso di difficoltà di messa in moto a causa del clima rigido.

Il transitorio dovuto al distacco del carico è il più nocivo ed avviene quando la corrente di carico dell'alternatore viene improvvisamente abbassata. Il caso più impegnativo inizia di solito con lo scollegamento di una batteria parzialmente scarica causato dalle connessioni difettose. Sono state osservate tensioni transitorie superiori a 100 V che durano fino a 0,5 secondi con livelli energetici che vanno dalle decine alle centinaia di Joule.

La commutazione di carichi induttivi, tipo motori e solenoidi, creerà delle tensioni transitorie di segno negativo con una escursione nel campo positivo di minori dimensioni. La forma d'onda della tensione, secondo le osservazioni effettuate, raggiunge un livello di −210 V e di +80 V, durando fino a 320 μs. L'impedenza del transitorio è ignota e questo induce molti progettisti a considerarla molto bassa, con il risultato di usare componenti più costosi del necessario.

Il transitorio dovuto alla diminuzione del campo nell'alternatore è essenzialmente analogo a quello dovuto alla commutazione di un carico induttivo. Quando si spegne la chiavetta di accensione, la diminuzione del campo nell'alternatore produce un picco negativo di tensione la cui ampiezza dipende dal ciclo del regolatore di tensione e dal carico. Essa varia tra -40 V e -100 V e può avere una durata di 200 ms.

All'arresto del motore sono stati registrati dei picchi di origine ignota che raggiungono i 600 V. Il distacco degli organi di regolazione, specialmente della batteria, accrescerà inoltre fino a livelli pericolosi dei fenomeni normalmente innocui. Con la batteria scollegata sono stati osservati, per esempio, degli impulsi di accensione che arrivano a 75 V con una durata di 90 μs.

Il Capitolo 6 fornisce un vasto panorama dei transitori che avvengono negli autoveicoli e delle tecniche pratiche usate per proteggere le apparecchiature elettroniche montate nell'auto.

1.6 GLI EFFETTI DEI TRANSITORI DI TENSIONE

1.6.1 Effetti sui semiconduttori

Tutti i dispositivi a semiconduttore hanno in comune l'intolleranza ai transitori che superino la tensione massima ammessa. Anche un transitorio di pochi microsecondi può causare la distruzione catastrofica del semiconduttore oppure ridurne le prestazioni e la vita utile.

Molto spesso avvengono dei danni quando si applichi un'alta tensione inversa ad una giunzione P-N nel verso dello sbarramento. Nella giunzione si può produrre un effetto valanga su una piccola zona della superficie a causa della disuniformità del

campo elettrico. Attraverso la giunzione passiva tra i terminali applicati alla superficie della piastrina si può avere anche un eccesso della corrente di perdita. Questa corrente può dar luogo ad un canale di bassa resistenza che diminuisce la capacità di blocco della tensione da parte della giunzione al di sotto del valore normale applicato. Nel caso dell'effetto valanga si può avere una deriva termica dovuta al riscaldamento localizzato, che può portare ad una fusione e quindi alla distruzione della giunzione.

Se la giunzione base-emettitore di un transistor è sottoposta ripetutamente ad effetto valanga oppure ad effetto zener da un impulso inverso, il guadagno diretto in corrente verrà diminuito. La sensibilità di sgancio di un tiristor verrà allo stesso modo diminuita dall'effetto zener che si avrà nella giunzione gate-catodo. I tiristori possono essere anche danneggiati se mandati in conduzione da un elevato picco di tensione (scarica diretta) sotto condizioni di polarizzazione tali da permettere un tasso di aumento della corrente (di/dt) superiore alle possibilità del componente. Questo avverrà in quasi tutti i circuiti reali a causa della scarica del circuito di protezione (dv/dt) a resistenza/capacità che farà superare la capacità del tiristor di seguire l'aumento di corrente e ne provocherà la distruzione.

1.6.2 Effetti sui contatti elettromeccanici

L'alta tensione generata dall'interruzione della corrente applicata ad un induttore, da parte di un contatto meccanico, provocherà a lungo andare puntinature, saldature, trasferimenti di materiale od erosione delle superfici a contatto. La natura della messa fuori uso definitiva dei contatti dipende da fattori come il tipo di metallo usato, la frequenza delle aperture, i rimbalzi dei contatti, il tipo di atmosfera, la temperatura, le correnti a regime ed in sovraccarico, ed il funzionamento in alternata oppure in continua. Forse il più importante di questi fattori è la quantità di energia dissipata ogni volta che i contatti funzionano.

Il fenomeno dell'interruzione della corrente da parte di un gruppo di contatti è piuttosto complesso. La rottura definitiva avviene su di un microscopico ponte metallico che, a causa del carico induttivo, è costretto a far passare praticamente tutta la corrente di esercizio originale. Il riscaldamento ohmico di questo ponte ne provoca la trasformazione in plasma che si comporterà da conduttore tra i contatti quando sia alimentato da una corrente e da una tensione superiori ad un certo livello di soglia. L'induttore, naturalmente, è più che felice di fornire una tensione adeguata ($OE_L = -L\,di/dt$). Quando i contatti si separano e la corrente diminuisce, viene raggiunto un livello di soglia e la corrente cessa improvvisamente ("chopping"). La corrente dell'induttore carica quindi le capacità disperse fino alla tensione di rottura dell'atmosfera che si trova tra i contatti (nel caso dell'aria questo avviene a 30 kV/per pollice). La capacità si scarica e si ricarica ripetutamente fino a quando non ha dissipato tutta l'energia. Questo arco riscalda i contatti a sufficienza per fondere, ossidare o "bruciare" il metallo; quando i contatti si richiuderanno il collegamento potrà avere una resistenza maggiorata. Se i contatti rimbalzano o

vengono richiusi troppo presto dopo l'arco, potranno essere sufficientemente fusi da saldarsi tra loro. La saldatura può anche avvenire come risultato di elevate correnti di sovraccarico che passino attraverso i ponti che si formano al momento della chiusura.

Delle buone tecniche di soppressione possono ridurre notevolmente la quantità di energia dissipata nei contatti, con un proporzionale aumento della vita utile. La soppressione può anche ridurre i disturbi elettromagnetici generati dagli archi. I dispositivi limitatori di tensione sono particolarmente adatti a prevenire i fastidiosi archi ripetitivi ad alta tensione descritti ed illustrati in precedenza nel Paragrafo 1.1.4.

1.6.3 Effetti sull'isolamento

Le sovratensioni transitorie possono provocare la perforazione dell'isolante, con il risultato di un disturbo temporaneo nel funzionamento oppure della messa fuori uso istantanea del componente. Nel primo caso il grado di isolamento risulterà indebolito con la conseguenza di una distruzione prematura. La gravità della perforazione varia con il tipo di isolamento (aria, liquido, oppure solido). I primi due tenderanno ad autorigenerarsi mentre la perforazione di un isolante solido (di solito materiali organici) tende a divenire una condizione permanente.

Gli spazi d'aria tra le parti metallichie dei componenti elettrici e tra i cablaggi di potenza si comportano secondo la normale legge fisica della perforazione degli strati d'aria (dipendenza dalla pressione, dall'umidità, dalla forma degli elettrodi e dalla spaziatura). Il gruppo di lavoro per la coordinazione dell'isolamento in bassa tensione appartenente alla Commissione Elettrotecnica Internazionale ha sviluppato una tabella che elenca le distanze minime in aria per le condizioni del campo elettrico tra gli elettrodi nel caso migliore e nel caso peggiore.[14] La perforazione dell'intervallo tra le parti metalliche può essere considerata come una forma di protezione atta a limitare la sovratensione sul resto del circuito. Questa protezione dipende però dalla facoltà della corrente alternata di linea di seguire le variazioni che avvengono durante l'arco di perforazione. Di norma la corrente residua potrà provocare l'intervento dei fusibili o delle protezioni del sistema. Se la corrente residua verrà limitata dall'impedenza del circuito i fusibili di protezione potranno anche non intervenire. In questo caso si potrà generare un calore sufficiente a provocare un incendio. Esperimenti sulle linee elettriche di potenza hanno dimostrato che gli intervalli tra le parti metalliche scaricano con regolarità e senza pericolo se sottoposti a transitori di tensione, mentre insorgono di rado problemi di potenza residua.

Nei dielettrici liquidi una perforazione impulsiva, che non sia seguita da un passaggio di corrente, di solito è innocua. Questo tipo di perforazione è però di interesse limitato nei sistemi a bassa tensione, per i quali viene raramente usato l'isolamento a liquido, tranne che in combinazione con un certo grado di isolamento solido.

La perforazione dell'isolamento solido provoca in genere la carbonizzazione locale di un materiale organico. I materiali isolanti inorganici vengono in genere danneggiati meccanicamente in modo definitivo. Se non avviene un passaggio residuo di corrente, il sistema può riprendere la sua funzionalità. Il degrado delle caratteristiche isolanti del materiale provoca però perforazioni con tensioni progressivamente più basse fino a quando una lieve sovratensione, compresa nella tolleranza della linea in corrente alternata, provocherà il definitivo e permanente cortocircuito. Dato che il guasto finale può avvenire in assenza di transitori, potrà risultare dissimulata la vera causa del problema.

Le scariche superficiali sul materiale isolante riguardano le norme sulla dispersione dielettrica. Il gruppo di lavoro della CEI prima citato sta anche compilando delle raccomandazioni riguardanti le distanze di dispersione. Il comportamento del sistema per quanto riguarda le dipersioni dielettriche è meno prevedibile della perforazione dello spessore isolante in quanto sarà l'ambiente (polvere, umidità) a determinare la capacità della superficie isolante ad opporsi alle correnti di dispersione.

Quando si considera la rigidità dielettrica di un qualunque sistema isolante, occorre ricordare due fatti fondamentali. Il primo è che la perforazione dell'isolante non è istantanea ma è regolata in base alle statistiche della ionizzazione a valanga. Esiste quindi una caratteristica "tensione-tempo" che induce il progettista a coordinare i sistemi di protezione in funzione della forma d'onda interferente. Il secondo fatto è che la distribuzione della tensione attraverso l'isolante solo raramente è lineare. Per esempio un fronte d'onda a gradino produce un accumulo di tensione nelle prime spire dell'avvolgimento di un motore, che spesso provoca riflessioni all'interno dell'avvolgimento. Anche la perforazione dell'intervallo tra due elettrodi, con punto di partenza sulla superficie, dipende in modo considerevole dalla geometria generale del campo, nonché dalle condizioni macroscopiche della superficie.

1.6.4 Effetti sull'assorbimento di potenza

Come conseguenza della sempre maggior pubblicità fatta al risparmio energetico, appare sul mercato un numero considerevole di dispositivi soppressori di transitori che promettono di ridurre i consumi. Questo con il presupposto che le sovratensioni transitorie potrebbero causare una degradazione dell'equipaggiamento elettrico con la conseguenza di aumentare le perdite e quindi lo spreco di energia. A sostegno di questa tesi non sono state portate prove convincenti ed in molte nazioni sono stati presi provvedimenti contro l'effettuazione di simili promesse.[15]

1.6.5 La generazione di disturbi

Con l'aumento della diffusione delle porte logiche ad alta sensibilità insorge spesso il problema dei disturbi specie quando nelle vicinanze sono in funzione

apparecchiature elettromeccaniche. I disturbi possono sconvolgere il funzionamento di macchine operatrici automatiche, di apparecchiature mediche, di calcolatori, di sistemi di allarme e di macchine controllate mediante tiristori. Questo sconquasso può dare origine a perdite di prodotto, di tempo, di denaro ed anche di vite umane. I disturbi penetrano in un sistema attraverso i cavi di collegamento oppure di massa o mediante induzione da fili adiacenti. La soppressione dei disturbi si può effettuare all'origine, sul ricevitore, oppure mediante isolamento. I disturbi sono iniettati quando esistono dei collegamenti di capacità dispersa oppure di mutua induzione tra il sistema che genera i medesimi ed il sistema sensibile. L'ampiezza del disturbo indotto è in relazione con la rapidità di variazione della corrente o della tensione del generatore di rumore. Le componenti in frequenza del rumore indotto (che sono le più difficili da filtrare) derivano dall'ampiezza degli impulsi transitori originali.

Spesso la sorgente dei disturbi è costituita dagli archi di interruzione dei contatti che alimentano un induttore, come per esempio una bobina di relé. Un arco di bassa corrente e ad alta tensione crea una serie di brevi scariche sotto forma di oscillazioni smorzate, con frequenze che vanno da alcuni kHz fino al campo dei MHz, e con ampiezze che vanno da 300 a varie migliaia di volt. Questi impulsi, e le loro riflessioni da parte dei carichi e delle discontinuità della linea, viaggiano lungo i fili, inducendo facilmente dei disturbi anche nei cablaggi adiacenti. Queste interferenze si eliminano nel modo migliore sopprimendole all'origine (l'induttanza) mediante dispositivi di limitazione della tensione tipo varistor.

1.7 RIVELAZIONE DEI TRANSITORI

I transitori hanno per definizione una breve durata e spesso avvengono in momenti imprevedibili. Queste due caratteristiche rendono difficile la rivelazione e la misura. Anche i transitori descritti in precedenza in questo capitolo come "ripetitivi", sono soggetti a variazioni che derivano dalla cadenza delle operazioni di commutazione, dal rimbalzo irregolare dei contatti e da altri eventi casuali.

Il rivelatore di transitori *per eccellenza* è l'oscilloscopio a memoria ed a larga banda, ma il suo costo elevato ne limita la disponibilità. Sono stati costruiti dei sistemi a specifica per rilevare sulla stessa apparecchiatura da proteggere i transitori,[16,17] ma anche in questo caso il prezzo costituisce un fattore di limitazione. Un oscilloscopio di tipo normale, a larga banda passante, può essere usato come monitor, qualora sia provvisto di un comando per spazzolamento singolo per il rilevamento dei transitori che avvengono in momenti casuali, ma con ripetizione relativamente frequente. L'operatore sistema il comando di trigger ad un certo livello di soglia, predisponendo l'apparecchio per lo spazzolamento singolo, ed attende che si accenda la luce di "pronto" sul pannello dell'oscilloscopio, mentre una macchina fotografica con l'otturatore aperto registra la traccia oscillografica. La pellicola viene estratta quando l'operatore si accorge che è avvenuto uno

spazzolamento, ottenendo di conseguenza un documento del fenomeno. Pur non essendo molto efficiente per un monitoraggio intensivo, questo metodo è molto utile in situazioni di emergenza di breve durata, ossia nella maggior parte di casi in cui si sospetta la presenza di transitori. Ora sono disponibili, per il monitoraggio senza sorveglianza, degli oscilloscopi a memoria digitale con trasferimento automatico dei dati su disco magnetico.

Negli ultimi anni, i maggiori fabbricanti di oscilloscopi hanno sviluppato dei tipi migliorati di apparecchi a memoria ed a larga banda ed ora la maggior parte dei laboratori è equipaggiata con uno o l'altro di questi strumenti. Il tecnico esperto può metterli all'opera e trarne delle registrazioni soddisfacenti usando la tecnica descritta in precedenza, prendendo le normali precauzioni contro le rivelazioni errate (attivazione da parte del rumore di fondo, correnti vaganti di massa, irradiazione di disturbi nei circuiti preamplificatori, eccetera).

In commercio sono disponibili strumenti di prova digitali ad analogici in grande varietà, come si potrà vedere nel Capitolo 7. Questi permettono il monitoraggio in economia da posizioni fuori mano fornendo vari gradi di memorizzazione (registrazione di un evento singolo, conteggio dei valori che superano una certa soglia, memoria digitale per riproduzione successiva, eccetera).

Le riviste tecniche e le pubblicazioni ingegneristiche hanno anche pubblicato un certo numero di rivelatori autocostruiti. Mentre questi avranno senza dubbio soddisfatto il loro creatore, si potrebbero porre delle domande sulla convenienza economica nell'investimento di tempo e risorse tecniche per riprodurre, mettere a punto e tarare un dispositivo fatto in casa, quando sono disponibili in commercio modelli che offrono prestazioni immediate e garantite.

1.8 LE MISURE E GLI STANDARD DEI TRANSISTORI

È auspicabile poter avere dei criteri di prova e delle definizioni che forniscano un linguaggio tecnico comune a beneficio sia degli utenti che dei fabbricanti di componenti per la protezione contro i sovraccarichi. Purtroppo durante gli anni sono pervenute nell'uso comune terminologie differenti derivate dalla pratica industriale. La normalizzazione delle prove ha avuto la tendenza a proliferare in quanto lo scopo della misura è di definire sia le caratteristiche del dispositivo di protezione che l'ambiente entro il quale esso troverà la sua applicazione.

Le caratteristiche dei componenti varieranno a seconda del principio fisico sul quale si basa la loro costruzione. I dispositivi di protezione funzionano secondo principi fisici diversi, come la scarica in un gas ionizzato, la scarica attravero la giunzione di un semiconduttore e la conduzione per "saltellamento di cariche". Per questo motivo sembra ragionevole raggruppare i componenti per categorie fisiche e compilare adatti standard che servono a caratterizzare il loro funzionamento. Gli standard adopereranno degli adatti livelli di sollecitazione per misurare quei parametri che siano critici nel determinare il comportamento corretto.

L'ambiente d'impiego ha richiesto di usare diverse condizioni nei livelli dei transitori. Le normative variano in rapporto all'impiego a cui un sistema è sottoposto; per dirne qualcuno, le cose sono diverse se si tratta di linee di trasporto dell'energia elettrica, di linee per telecomunicazioni, di impianti su automezzi, oppure aerei. Ciascun ambiente d'impiego è stato inoltre definito con precisione ben lontana dall'essere assoluta, e questo ha condotto ad ulteriori diversità nella scelta della forma d'onda, della sua ampiezza e durata.

Molte organizzazioni, quali la IEEE, la CEI, la UL, la NEMA, continuano a sviluppare linee direttive e norme per descrivere come dovrebbe essere verosimilmente l'ambiente sulla base di registrazioni raccolte e di esperienze in applicazioni pratiche. Derivandole da queste, sono state preparate delle normative di prova[17,18,19,20] che permettono una valutazione obiettiva e realistica circa la convenienza di applicare determinati soppressori. Nel Capitolo 7 troveremo una breve panoramica di queste normative.

BIBLIOGRAFIA

1. F.D. Martzloff, "A Guideline on Transient Overvoltages in Low-Voltage AC Power Circuits," *Report 77CRD221*, General Electric Company, Schenectady, New York (1977).
2. Allan Greenwood, "Electrical Transients in Power Systems," Wiley-Interscience, New York (1971).
3. D.W. Bodle, A.J. Ghaze, M. Syed and R.L. Woodside, "Characterization of the Electrical Environment," (University of Toronto Press, 1970).
4. "Preliminary Recommended Environmental Practices for Electronic Equipment Design," *Book No. P57*, Society of Automotive Engineers, Warrendale, Pennsylvania.
5. G.J. Hahn and F.D. Martzloff, "Surge Voltages in Residential and Industrial Power Circuits," *IEEE Trans. PAS-89*, No. 6, 1049-56 (July-Aug. 1970).
6. J.H. Bull, "Voltage Spikes in L.V. Distribution Systems and Their Effects on the Use of Electronic Control Equipment," Report No. 5254, Electrical Research Assn., Cleeve Rd., Leatherhead, Surrey, Great Britain (1968).
7. IEEE Surge Protective Devices Committee, "Bibliography on Surge Voltages in AC Power Circuits Rated 600 Volts or Less," *IEEE Trans, PAS-89*, No. 6, 1056-61 (July-Aug. 1970).
8. Data contributed by Mr. L. Regez (Landis & Gyr. Co., Zug, Switzerland), Swiss representative to the IEC Working Group 28A on Low Voltage Insulation Coordination.
9. Surge Arresters for Alternating Current Power Circuits, ANSI Standard C.62.1 (1975), IEEE Standard 28 (1974).
10. Guide for Surge Withstand Capability (SWC) Test, Standard C37.90a (1974), IEEE Standard 472 (1974).
11. F.D. Martzloff and F.A. Fisher, "Transient Control Level Philosophy and Implementation - The Reasoning Behind the Philosophy," 77CH1224-SEMC, *Proceedings of the 2nd Symposium on EMC*, Montreux (June 1977).
12. F.A. Fisher, "A Way to Evalute the Effects of Changing Magnetic Fields on Shielded Conductors," Report 77CRD158, General Electric Co., Schenectady, New York (July 1977).
13. E. Bennison, A. Ghazi and P. Ferland, "Lightning Surges in Open Wire, Coaxial and Paired Cables," *IEEE Trans.*, COM-21, 1136-43 (Oct. 1973).

14. IEC Document 28A (Central Office) 5, "Insulation Co-ordination Within Low-Voltage Systems, including Clearances and Creepage Distances for Equipment."

15. George W. Allen, "Design of Power-Line Monitoring Equipment," *IEEE Trans. PAS-90*, No. 6, 2604-09 (Nov.-Dec. 1971).

16. R. Herzog, *Machine Design Magazine,* "How to Catch a Transient," 170-75 (March 1973).

17. Test Specifications for Gas Tube Surge-Protective Devices, IEEE Standard 465.1 (1977). (Other standards for various types of suppressors in preparation.)

18. *Test Specification for Gas Tube Surge Protective Devices,* IEEE Std. C62.31, 1981.

19. *Test Specifications for Low Voltage Air Gap Surge Protective Devices, Excluding Valve and Expulsion Type Devices,* IEEE Std. C62.32, 1981.

20. *Test Specifications for Varistor Surge Protective Devices,* IEEE Std. C62.33, 1982.

LA COMPILAZIONE DI UNA GUIDA RIGUARDANTE LE SOVRATENSIONI NEI CIRCUITI IN CORRENTE ALTERNATA DI BASSA POTENZA

F.D. Martzloff, membro IEEE,
General Electric Company;
Schenectady, NY

Le tensioni transitorie nei circuiti in c.a. di potenza acquistano un significato sempre maggiore man mano che aumentano le applicazioni dei componenti elettronici miniaturizzati nelle apparecchiature destinate al consumo oppure agli usi industriali. Un gruppo di lavoro della IEEE ha messo a punto una guida che descrive la natura di questi transitori nei circuiti di potenza in alternata con tensioni di esercizio fino a 600 V, ed attualmente sta preparando una Guida applicativa per facilitare l'impiego dei dati ambientali definiti nella Guida allo scopo di migliorare la protezione.

La guida propone due forme d'onda, una di tipo oscillatorio ed un'altra unidirezionale, a seconda della locazione che si considera all'interno del sistema di potenza. Ci sono anche delle raccomandazioni riguardanti l'impedenza del generatore oppure la corrente di cortocircuito. Questa pubblicazione descrive i dati di base ed il metodo, impiegati dal Gruppo di lavoro, nonché le raccomandazioni che sono state proposte circa il modo di rappresentare le sovratensioni tipiche, e questo per poter avere degli elementi derivati dalle applicazioni pratiche, prima di scrivere la Guida Applicativa.

INTRODUZIONE

Le sovratensioni che si verificano nei circuiti di potenza in c.a. possono essere causa di malfunzionamenti o di danni alle apparecchiature, sia negli impianti domestici che in quelli industriali. Questo problema è diventato molto urgente negli anni più recenti perché i componenti miniaturizzati allo stato solido sono molto più sensibili ai picchi ed ai transitori di tensione di quanto non lo fossero i componenti usati qualche anno fa.

Per quanto siano ben note sia le ampiezze delle sovratensioni che la frequenza probabile di questi eventi nei circuiti privi di protezione, le loro forme d'onda e le loro energie sono oggetto di una conoscenza più limitata. Sulla base di misure, statistiche e considerazioni teoriche, si potrà, nonostante tutto, stabilire una guida pratica per definire l'ambiente da impiegare nella previsione di quali saranno le forme d'onda in condizioni estreme ed il relativo contenuto energetico. Un gruppo di lavoro del Surge Protective Devices Committee (comitato per i dispositivi di

protezione contro i fenomeni transitori), ha messo a punto la Guida descrittiva, [1], e sta ora mettendo a punto una Guida Applicativa. Questa pubblicazione presenta una breve panoramica della Guida e dell'indirizzo assunto nella Guida Applicativa. A riguardo di quest'ultima, saranno graditi commenti ed osservazioni circa gli obiettivi e gli indirizzi assunti nella compilazione.

SCOPO

Entrambe le Guide si riferiscono principalmente ai circuiti di potenza in alternata con tensioni di esercizio che arrivano fino a 277 V tra fase e massa, per quanto molte delle soluzioni a cui si perviene possano anche essere applicate a tensioni più alte ed anche ad alcuni sistemi a c.c. di potenza. Sono apparse anche altre normalizzazioni [2], come le norme IEEE 472 "guida alle prove di resistenza alle sovratensioni (SWC)", destinate all'impiego nelle sottostazioni ad alta tensione, e le norme IEEE 28 "normalizzazione dei soppressori di sovratensioni nei circuiti di potenza in c.a." [3]. Queste norme coprono in primo luogo il campo dei servizi. Le Guide sono destinate a completare e non a contrastare le norme esistenti.

Le sovratensioni considerate nelle Guide sono quelle che superano il valore doppio della tensione di esercizio di picco, con durate che vanno da una frazione di microsecondo ad un millisecondo. Non vengono considerate sovratensioni di meno di 2 per unità, e neanche i transitori di maggior durata che derivano dal funzionamento delle apparecchiature e da guasti. A causa della loro scarsa ampiezza e della lunga durata, questi transitori non si possono in genere sopprimere con i dispositivi di protezione tradizionali: per essi ci vogliono tecniche di protezione differenti. Mentre il principale scopo della Guida già esistente è quello di *descrivere l'ambiente d'impiego*, uno scopo secondario sarà quello di introdurre il lettore alle prove normalizzate che appariranno eventualmente nella Guida Applicativa.

LE ORIGINI DELLE SOVRATENSIONI

I transitori che avvengono nei circuiti di potenza in alternata a bassa tensione hanno due principali origini: transitori dovuti a commutazioni nel sistema ed effetti diretti od indiretti delle scariche atmosferiche sul sistema di distribuzione. I transitori di commutazione possono a loro volta essere suddivisi in fenomeni relativi a:
1) Disturbi di maggiore entità, come la commutazione di banchi di condensatori;
2) Disturbi di portata minore con origine in prossimità del punto che interessa, come la commutazione di un elettrodomestico o lo spegnimento di altri carichi in un singolo sistema;
3) Circuiti oscillatori collegati ai dispositivi di commutazione, come per esempio i tiristori;
4) Difetti diversi nel circuito, come i cortocircuiti e gli archi tra i contatti.

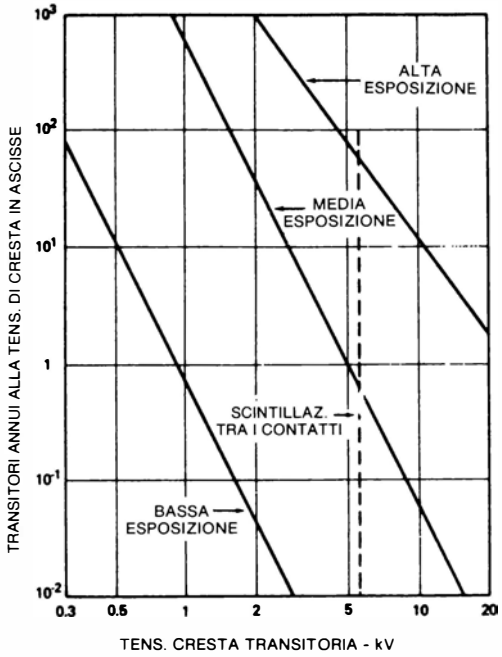


Figura 1 - Frequenza dei transitori rispetto al livello della tensione nei luoghi dove non esiste protezione.
* In molte situazioni, la formazione di scintille negli intervalli di separazione dei contatti, potrebbe limitare le sovratensioni.

Le misure ed i calcoli eseguiti sugli effetti delle scariche atmosferiche hanno potuto fornire dati sui livelli probabili, anche se è ancora ignoto il meccanismo di ogni singolo picco. Mentre i dati sono stati principalmente ricavati su sistemi a 120, 220/380 oppure 277/480 V, le conclusioni generali dovrebbero essere valire anche per i sistemi a 600 V. Ritenendo che le sovratensioni siano originate da una quantità limitata di energia che venga iniettata in un sistema di potenza, i sistemi pesanti industriali a bassa impedenza dovrebbero sperimentare picchi ad ampiezza inferiore nei confronti dei sistemi domestici a 120 V, mentre l'energia da dissipare nel soppressore sarebbe uguale o maggiore.

FREQUENZA DEGLI EVENTI E LIVELLI DELLE TENSIONI NEI CIRCUITI NON PROTETTI

La frequenza alla quale avvengono i fenomeni transitori può variare entro ampi limiti, a seconda del particolare sistema di potenza. Fare delle previsioni su questa frequenza è sempre difficile e spesso impossibile. La frequenza dipende dal livello dei transitori: quelli di basso livello sono più frequenti di quelli ad alto livello.

È essenziale sapere che una sovratensione osservata in un sistema di potenza potrà essere a tensione totale oppure a tensione limitata dallo scintillamento che avviene tra due contatti che provocano il disturbo. Si deve perciò intendere come *circuito non protetto* un circuito nel quale non sono stati installati dispositivi di protezione a bassa tensione, nei quali però la scarica tra i contatti potrà eventualmente servire da limitazione della tensione massima. La distribuzione dei livelli di sovratensione è perciò influenzata dai meccanismi che li generano, ed anche dal livello di scintillazione tra i contatti del sistema. La distinzione tra tensione effettiva di pilotaggio e la tensione limitata dagli scintillamenti assume particolare importanza all'interfaccia tra gli equipaggiamenti che si trovano all'esterno e quelli interni. Le apparecchiature esterne hanno in genere uno spazio di scarica maggiore e perciò le scariche stesse saranno di livello maggiore: possono verificarsi quasi sempre livelli di 10 kV, con la possibilità di arrivare a 20 kV. Viceversa, la maggior parte dei circuti interni impiegati nei sistemi a 120-240 V, hanno livelli di scarica di circa 6 kV; si può quindi scegliere questo livello di 6 kV come limite tipico per le sovratensioni che avvengono nei sistemi di distribuzione interna.

Dati raccolti da diverse origini hanno permesso di tracciare la curva di Figura 1. Queste previsioni dimostrano con certezza che esiste solo una frequenza *relativa* degli eventi, mentre il numero *assoluto* degli eventi potrà essere descritto solo in termini di "bassa esposizione", "media esposizione" oppure "alta esposizione". Questi livelli di esposizione possono essere definiti, in termini generali, come segue:

Bassa esposizione: Sistemi che si trovano in aree geografiche note per una bassa attività elettrica atmosferica, con bassa incidenza di commutazioni sotto carico.

Media esposizione: Sistemi situati in aree geografiche note per un'elevata attività elettrica atmosferica, con frequenti e potenti transitori di commutazione.

Alta esposizione: Un caso raro ma possibile di sistemi alimentati da lunghe linee fuori terra, soggette a riflessioni ai terminali della linea stessa, nei quali le caratteristiche dell'installazione producono elevati livelli di scarica ai contatti.

Le due linee inferiori della figura 1 sono state disegnate con la stessa pendenza, poiché i dati di base dimostrano che con questa pendenza è possibile raggiungere un compromesso ragionevole tra le diverse origini dei disturbi. Tutte le linee possono essere troncate dall'intervento di scariche ai contatti, i cui livelli dipendono dalla tensione di rottura nell'intervallo di separazione. Occorre tener conto della linea di "alta esposizione", ma questa non dovrà essere applicata in modo indiscriminato a tutti i sistemi, perché nella maggior parte delle installazioni che presentano un rischio inferiore, i costo non sarà remunerativo.

Dai valori relativi che compaiono in figura 1, si potranno citare due livelli tipici per le applicazioni pratiche. In primo luogo, la prevedibilità dei transitori a 3 kV nei circuiti a 120 V varia da 0,01 a 10 per ogni anno, in una determinata locazione; si tratta di un numero sufficientemente elevato da giustificare la raccomandazione di

adottare una protezione d 3 kV minimi. In secondo luogo, l'isolamento dei dispositivi cablati mostra che potrebbe essere sufficiente una protezione a 6 kV per assicurare la sopravvivenza dei circuiti in ambiente interno, mentre all'esterno potrebbe essere necessaria una capacità di resistenza di 10 kV o più.

Le ampiezze della tensione e della corrente presentate nella Guida tentano di dare una soluzione alla protezione contro la maggior parte delle scariche atmosferiche, senza per questo dover sempre prevedere l'eventualità più grave, perché un tale concetto non può essere definito realisticamente. Si potrebbe pensare in termini di distribuzione statistica delle sollecitazioni, accettando un limite superiore ragionevole, che valga per la maggior parte dei casi. Dove le conseguenze di un guasto non siano di carattere catastrofico, ma rappresentino soltanto un fastidio od una piccola spesa in più, sarà opportuno fare un compromesso tra il costo della protezione e la probabilità di un guasto dovuto a picchi elevati ma rari. Un fabbricante può, per esempio, essere costretto a far fronte a frequenze di guasto di carattere nazionale, ossia a quelle che appaiono ai limiti superiori della curva di distribuzione, mentre l'utente di un sistema specifico potrebbe essere costretto a far fronte ad un unico guasto che avvenga in una data località alle condizioni di "massima gravità". Le frequenze si possono però prevedere facendo una media tra i sistemi: per quanto imprecise, queste previsioni possono costituire una guida per i fabbricanti e gli utenti. Di uguale importanza è l'osservazione che i picchi nel campo che va da 1 a 2 kV, sono piuttosto normali nei circuiti delle case di abitazione.

Le sovratensioni avvengono ad istanti casuali rispetto alla frequenza di rete, ed il modo in cui si guastano le apparecchiature può essere influenzato dalla corrente residua alla frequenza di rete. Inoltre, la frequenza dei picchi rispetto a quella di rete potrà aumentare il tasso di incidenza dei guasti. Di conseguenza, quando ci si attende un effetto negativo sul modo di guasto; occorre eseguire un controllo della resistenza dell'apparecchio ai transitori, con la tensione di rete applicata al campione in esame.

I transitori che derivano dai fulmini sono completamente casuali rispetto alla frequenza di rete. I transitori di commutazione tendono ad apparire in prossimità del passaggio per lo zero dell'onda, o dopo questo istante, ma le condizioni variabili delle potenze assorbite dei carichi produrranno anche in questo caso una distribuzione quasi casuale. Molti semiconduttori mostrano dei tassi di guasto dipendenti dalla frequenza dei transitori rispetto alla conduzione della corrente alla frequenza di rete. Degli scaricatori od altri dispositivi che possano dare origine ad una corrente residua, potranno resistere ad essa con successo solo per determinare porzioni del semiperiodo che stanno tra il transitorio ed il passaggio per lo zero. È perciò importante che si tenga conto della frequenza dei transitori rispetto alla frequenza di rete. Nelle prove di esercizio potranno essere prescritte la casualità totale degli eventi oppure una frequenza controllata, che disponga di un sufficiente numero di cadenze diverse che possano permettere di vedere quale tra esse sia la più critica.

FORME D'ONDA DELLE PIU' COMUNI TENSIONI TRANSITORIE

Forme d'onda in casi reali

In locali interni: Le misure effettuate sul luogo di applicazione, in laboratorio, ed i calcoli teorici dimostrano che la maggior parte delle sovratensioni che si verificano nei sistemi al coperto a bassa tensione, hanno carattere oscillatorio, a differenza delle onde ben note e generalmente accettate, di tipo unidirezionale che si trovano nelle prescrizioni riguardanti l'isolamento ad alta tensione. Un transitorio che entra nel sistema eccita il sistema di conduttori alla sua frequenza di oscillazione naturale. Da questo risulta non solo il carattere oscillatorio del fenomeno, ma una diversa ampiezza e forma d'onda di queste sovratensioni in diversi punti dell'impianto. Le frequenze di questi fenomeni oscillatori variano da 5 kHz a più di 500 kHz. Una misura molto realistica della frequenza del transitorio "tipico" nelle reti di distribuzione per usi domestici o per piccole industrie sarà tra i 30 ed i 100 kHz.

Impianti esterni e cabine: I transitori che si incontrano all'esterno possono essere sia oscillatori che unidirezionali. Il classico "transitorio da fulmine" dovrebbe avere una durata di 1,2/50 μs per l'onda di tensione, e di 8/20 μs per l'onda di corrente, ma queste forme d'onda non devono avere l'aspetto di quelle caratteristiche degli impianti a bassa tensione. Le scariche atmosferiche inducono oscillazioni, riflessioni e perturbazioni che appaiono alla fine come oscillazioni smorzate nei sistemi a bassa tensione. Lenz [4)] riferisce di 50 transitori di fulmine registrati in due località, il maggiore dei quali raggiungeva i 5,6 kV, con frequenze variabili tra 100 e 500 kHz. Martzloff [5)], riferisce di sovratensioni oscillatorie osservate in una casa durante la caduta di un fulmine a scarica multipla.

Poiché l'elemento principale da considerare è l'energia associata a questi transitori, la forma d'onda che bisognerà scegliere dovrà avere un'energia maggiore di quella adottata per gli ambienti interni. I soppressori secondari di transitorio hanno dietro di sé una lunga storia di ottime prestazioni, in quanto soddisfano alle norme ANSI C62.1, come vedremo più avanti con maggiori particolari; si possono di conseguenza adottare queste specifiche come se fossero una rappresentazione realistica delle forme d'onda dei transitori all'esterno.

Scelta delle forme d'onda rappresentative

La definizione della forma d'onda che dovrà essere usata per rappresentare l'ambiente, è importante per il progetto dei componenti destinati al ruolo di protezioni, perché delle premesse non realistiche, come la durata eccessiva della sovratenione, oppure l'impedenza del generatore troppo bassa, pongono al soppressore delle condizioni proibitive per quanto riguarda la dissipazione energetica, con un risultante maggior costo per l'utilizzatore. I due requisiti che seguono rispecchiano queste valutazioni.

Impianti interni: La forma d'onda di figura 2, che si basa su misure condotte da parecchie organizzazioni indipendenti su sistemi a 120 e 240 V, rappresenta in modo ragionevole una extratensione che avvenga in questi circuiti di distribuzione. Secondo la descrizione proposta per un "onda oscillatoria smorzata da 0,5 μs - 100 kHz", questa forma d'onda sale al valore di picco in 0,5 μs, e poi decresce in modo oscillatorio ad una frequenza di 100 kHz; ogni picco ha un'ampiezza del 60% circa di quello precedente.

Il fronte di salita molto veloce produce effetti connessi con la distribuzione non lineare della tensione negli avvolgimenti ed anche effetti di dv/dt nei semiconduttori. In molti transitori si sono trovati tempi di salita ancora più brevi ma, quando transitori di questo tipo si propagano nei conduttori o sono riflessi da discontinuità dei medesimi, il tempo di salita si allunga.

La sezione di coda ad oscillazione smorzata produce gli effetti dell'inversione di polarità nei soppressori di transitorio, od anche in altri componenti sensibili a tale eventualità. Molti semiconduttori possono subire danni quando vengano forzati nello stato di conduzione od in quello di interdizione, oppure quando il transitorio avvenga in particolari sezioni dell'onda a 50 Hz di rete.

In esterno: All'esterno e nelle cabine, ed anche nelle loro adiacenze, è ancora disponibile una notevole quantità di energia o di corrente, al contrario di quanto avviene all'interno degli edifici, ove ha luogo un'attenuazione. In questi luoghi, gli impulsi unidirezionali già stabiliti per gli scaricatori secondari, sono più appropriati dell'onda oscillatoria.

In accordo con quanto detto, la forma d'onda raccomandata sarà di 1,2/50 μs per la tensione a circuito aperto applicata a dispositivi ad alta impedenza, e di 8/20

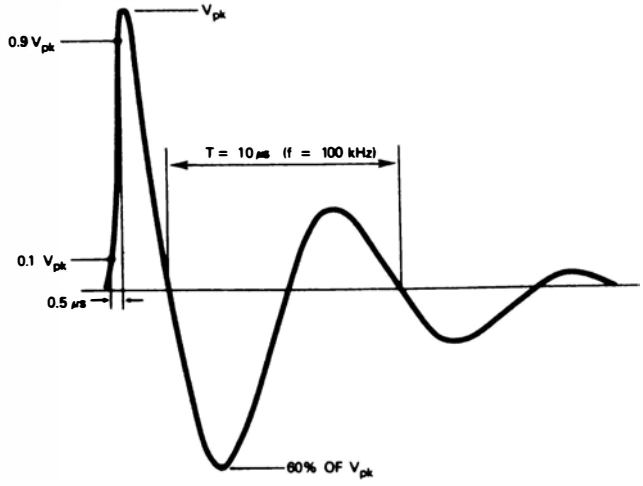


Figura 2 - L'onda oscillatoria da 0,5 μs - 100 kHz proposta (tensione a circuito aperto).

μs per la corrente di scarica o la corrente nei dispositivi a bassa impedenza. I numeri usati per descrivere l'impulso (1,2/50 ed 8/20) sono quelli definiti nelle norme IEEE 28-Norme ANSI c.62.1; la figura 3 mostra la forma d'onda e la descrizione grafica delle cifre.

ENERGIA ED IMPEDENZA DEL GENERATORE

Considerazioni generali

L'energia coinvolta nell'interazione di un sistema di potenza con un generatore di transitorio ed un soppressore del medesimo, si suddividerà tra il generatore ed il soppressore a seconda del valore delle due impedenze. Nei soppressori del tipo a scaricatore, la bassa impedenza dell'arco successivo alla scarica, fa in modo che la maggior parte dell'energia sia dissipata altrove: per esempio in una resistenza montata in serie all'intervallo di scarica, che serva a limitare la corrente secondaria. I soppressori ad assorbimento di energia, per la loro propria natura, si prendono una considerevole parte dell'energia del transitorio, ma la loro azione limitatrice non provoca le correnti secondarie risultanti dal cortocircuito del tratto di scarica di uno scaricatore tradizionale. È perciò essenziale per l'uso efficace dei soppressori, che siano stabili dei presupposti realistici nei riguardi dell'impedenza del generatore di transitorio del quale si devono riprodurre gli effetti.

L'onda di tensione che si vede in figura 2 vuol rappresentare la forma d'onda che un generatore di transitorio produrrebbe ai capi di un circuito aperto. La forma d'onda sarà diversa quando il generatore verrà collegato ad un carico di bassa impedenza, ed il grado di abbassamento sarà funzione dell'impedenza del generatore.

Per evitare incomprensioni, occorre fare una distinzione tra *impedenza di generatore* ed *impedenza di transitorio*. L'impedenza di transitorio, detta anche *impedenza caratteristica* è un concetto che si riferisce ai parametri di una linea nei riguardi della propagazione delle onde progressive. Per quanto riguarda le situazioni pratiche degli impianti elettrici qui trattati, questa impedenza caratteristica dovrebbe essere dell'ordine di 150...300 ohm ma, perché la durata delle onde di cui si è già parlato (50...20 μs) è superiore di molto al tempo di trasferimento delle onde progressive nell'impianto di distribuzione in esame, sarà in questo caso inutile parlare di queste onde progressive.

L'impedenza di generatore, definita come "l'impedenza presentata da un generatore di energia ai terminali d'ingresso di un circuito od apparecchiatura" (norme IEEE 100), è il concetto che in questo caso si rivela più pratico. Nella descrizione convenzionale di Thevenin, la tensione a circuito aperto (ai terminali del circuito o del generatore di prova), e l'impedenza del generatore (del generatore di transitorio o del generatore di prova), sono sufficienti a calcolare la corrente di cortocircuito, come pure una qualsiasi corrente per una data impedenza del soppressore.

Le misure dalle quali è stata ricavata la figura 1, si riferivano solo alla tensione. Poco si sapeva dell'impedenza del circuito sottoposto alla misura. Dopo di allora

sono state fatte delle misure di impedenza dei sistemi di distribuzione elettrica. Bull [6] riferisce che l'impedenza di un tale sistema, vista dai morsetti, mostra le caratteristiche di una resistenza da 50 ohm con 50 μH in parallelo. Sono stati fatti dei tentativi per combinare la tensione osservata di 6 kV a circuito aperto con il presupposto di un'impedenza di 50 ohm/50 μH.

Questa combinazione dà luogo ad una limitata capacità di assorbimento energetico, ma questo è stato contraddetto dall'esperienza delle osservazioni del comportamento dei soppressori. Questo problema ci conduce alla definizione proposta dalle onde oscillatorie, come pure delle onde unidirezionali ad alta energia, in modo

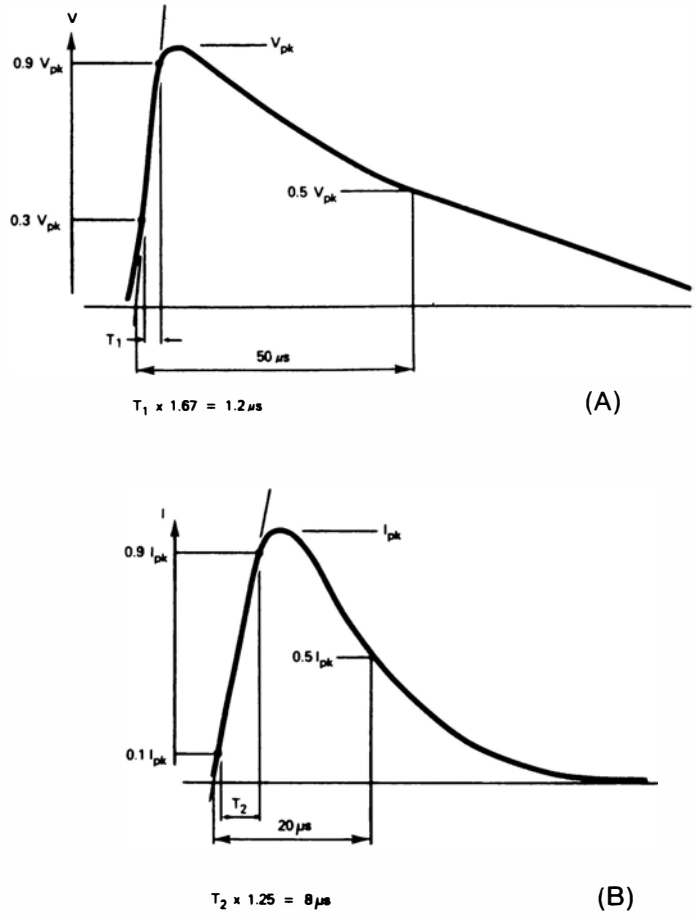
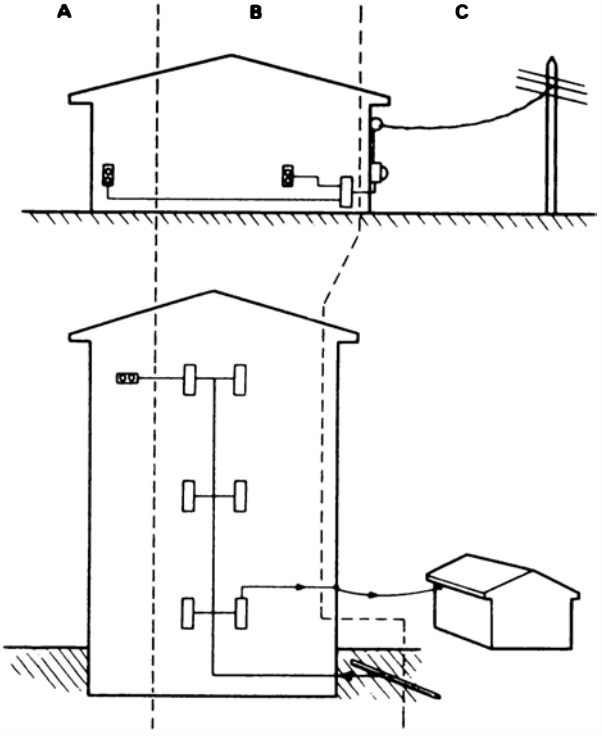


Figura 3. Forme d'onda unidirezionali (norme ANSI C62.1) a circuito aperto (A) in tensione, e forma d'onda (B) della corrente di scarica.

da arrivare a produrre gli effetti dell'onda oscillatoria combinati con una buona dissipazione energetica.

Il grado d'importanza dell'impedenza di generatore dipende molto dal tipo di soppressori impiegati. I soppressori devono essere in grado di resistere alla corrente



A) *Prese e lunghi circuiti derivati.*
Tutte le prese a più di 10 m della categoria B con fili # 14-10.
Tutte le prese a più di 20 m, della categoria C, con fili # 14-10.

B) *Cavi principali e corte diramazioni.*
Componenti di quadri di distribuzione.
Linee principali di distribuzione in impianti industriali.
Prese per correnti forti con "brevi" collegamenti alla cabina.
Sistemi di illuminazione in edifici commerciali.

C) *Impianti esterni e di cabina.*
Cavo di servizio tra palo e cabina.
Tratto tra contatore e quadro di distribuzione.
Da linea principale ad edifici staccati.
Linee sotterranee per pompe di pozzo.

Figura 4 - Categorie delle situazioni d'impianto.

ceduta ad essi dal generatore di transitorio. Un generatore di prova con impedenza troppo elevata potrebbe non sottoporre l'apparecchio in prova a sollecitazioni sufficienti, mentre un generatore di impedenza troppo bassa potrebbe sottoporre gli elementi di protezione a sollecitazioni eccessive e non realistiche. Un'onda di

prova prescritta senza far riferimento all'impedenza di generatore, dovrebbe implicare impedenza nulla del generatore stesso, ossia tale da produrre la sua tensione su qualsiasi impedenza, perfino sul cortocircuito. Questo fatto implicherebbe una corrente transitoria di valore infinito, e chiaramente questa situazione non è realistica.

A causa della vasta gamma di impedenze di generatore possibili, e della difficoltà di scegliere uno specifico valore, vengono proposte tre grandi categorie di immobili che rappresentano un'ampia maggioranza delle situazioni, da quelle vicine alla sottostazione a quelle da essa lontane. L'impedenza del generatore di transitorio aumenta dall'esterno all'interno degli edifici. Le tensioni a circuito aperto mostrano peraltro piccole variazioni all'interno degli edifici, perché i cablaggi hanno una bassa attenuazione. La figura 4 illustra la suddivisione in tre categorie degli impianti elettrici di un edificio.

Per le due collocazioni più comuni, la Tabella 1 mostra le tensionie e le correnti transitorie raccomandabili, con le forme d'onda e le ampiezze, ed anche dei campioni di alta o bassa impedenza. Per una data corrente di scarica, le ultime due colonne mostrano l'energia che dovrebbe essere dissipata in un soppressore che esegua la limitazione a 500 V ed a 1000 V, tensioni tipiche, rispettivamente, dei componenti per 120 V e 240 V. Per tensioni più elevate del sistema (ritenendo che i valori della corrente siano i medesimi), l'energia dovrebbe aumentare in proporzio-

TABELLA 1. TENSIONI TRANSITORIE E CORRENTI CHE SI RITIENE RAPPRESENTINO L'AMBIENTE INTERNO, CON I VALORI RACCOMANDATI PER L'USO NELLA PROGETTAZIONE DEI SISTEMI DI PROTEZIONE

Categoria delle collocazioni	Confrontabile alla categoria IEC 664	Impulsi		Tipo del campione o circuito di carico	Energia (Joule) dissipata in un soppressore con tensione di limitazione di:	
		Forma d'onda	Massima ampiezza d'esposizione		500V	1000V
					(120V System)	(240V System)
A. derivazioni lunghe e prese	II	0.5 µs - 100 kHz	6k V 200 A	Alta impedenza[1] Bassa impedenza[2]	— 0.8	— 1.6
B. Linee principali e derivazioni corte, centri di distribuzione	III	1.2/50 µs 8/20 µs	6k V 3k A	Alta impedenza[1] Bassa impedenza[2]	— 40	— 80
		0.5 µs - 100 kHz	6k V 550 A	Alta impedenza Bassa impedenza	— 2	— 4

Note: **(1)** Per campioni di prova ad alta impedenza o per circuiti di carico, le tensioni riportate rappresentano i transitori. Nell'effettuare prove di simulazione, usare questo valore come tensione a circuito aperto del generatore di prova.

(2) Per campioni di prova a bassa impedenza, o circuito di carico, le correnti tabellate rappresentano la corrente di scarica del transitorio (non la corrente di corto circuito del sistema elettrico di distribuzione). Quando si effettuano delle prove simulate, si faccia uso di questa corrente come corrente di cortocircuito del generatore di prova.

(3) Altri soppressori con tensioni di limitazione diverse, potranno dissipare livelli diversi di energia.

ne alla tensione di limitazione di un soppressore adatto alla tensione di quel sistema.
I valori di tabella 1 rappresentano la gamma più estesa e corrispondono alla situazione di "esposizione media" della figura 1. Per i sistemi meno esposti, oppure quando la prospettiva di guasto non sia poi tanto pregiudizievole, si potranno prescrivere valori più bassi per le tensioni a circuito aperto, con la corrispondente riduzione delle correnti di scarica.

La tensione a circuito aperto da 6 kV deriva da due fatti: l'azione limitante delle scariche e la propagazione senza attenuazione che si ha in un sistema privo di carico. La corrente di scarica da 3 kA della categoria B deriva da risultati sperimentali: esperienze su impianti in normale esercizio, riguardanti le prestazioni dei soppressori e prove simulate alla scarica atmosferica. I due livelli di corrente di scarica derivati dall'onda da 0,5 μs - 100 kHz, derivano dall'aumento di impedenza che ci si attende passando dalla categoria B alla categoria A.

Le collocazioni della categoria C hanno la probabilità di essere esposte a tensioni sostanzialmente maggiori rispetto alla categoria B, perché non è più disponibile l'effetto limitatore delle scariche. Si possono applicare i tassi di "esposizione media" della figura 1, con tensioni superiori a 10 kV e correnti di scarica di 10 kA o più. Non è raccomandabile l'installazione di carichi privi di protezione nelle situazioni della categoria C; l'installazione di scaricatori secondari potrà però garantire la necessaria protezione. Scaricatori secondari con portata di 10 kA sono stati impiegati con successo per molti anni in situazioni di categoria C (norme ANSI C62.1 e C62.2).

Il sottocomitato 28A della commissione elettrotecnica internazionale ha anche preparato un rapporto [8)] nel quale vengono definite le categorie di installazione. Queste categorie di installazione dividono i sistemi di distribuzione a seconda della loro collocazione entro gli edifici, in modo analogo alle categorie di collocazione definite nella Guida. Le tre categorie qui presentate sono confrontabili a tre delle quattro categorie definite dal sottocomitato 28A, con le prescrizioni supplementari che riguardano l'impedenza di generatore oppure la corrente di scarica. Le apparecchiature collegate alle prese della categoria A, corrispondono alle apparecchiature collocate nella categoria I IEC; la categoria C corrisponde alla categoria IV della IEC.

Ci sono però alcune differenze significative tra i due concetti. Per cominciare, le categorie IEC sono definite "per una situazione di tensione controllata", una frase che implica l'esistenza di un qualche sistema di soppressione dei transitori, o per lo meno per la loro attenuazione atta a ridurre i livelli della tensione da una categoria a quella successiva. In secondo luogo, il rapporto IEC è maggiormente dedicato alla coordinazione degli isolamenti, piuttosto che all'applicazione dei dispositivi di protezione ai transitori; di conseguenza esso non affronta la questione dell'unificazione di questi componenti, ma piuttosto la coordinazione dei livelli di isolamento, ossia delle tensioni. Non sono state definite, a differenza di quanto avviene nella

guida, le impedenze di generatore. Le successive discussioni ed il lavoro sulla Guida Applicativa, dovrebbero probabilmente produrre un consistente pacchetto di raccomandazioni.

GUIDA DELLE APPLICAZIONI

La vasta gamma di sovratensioni che si verificano nei circuiti di distribuzione c.a. a bassa tensione possono essere simulate da un piccolo gruppo di onde di prova che serviranno a valutare il loro effetto sugli apparecchi. Le misure in normale esercizio, gli esperimenti di laboratorio ed i calcoli indicano che due forme d'onda

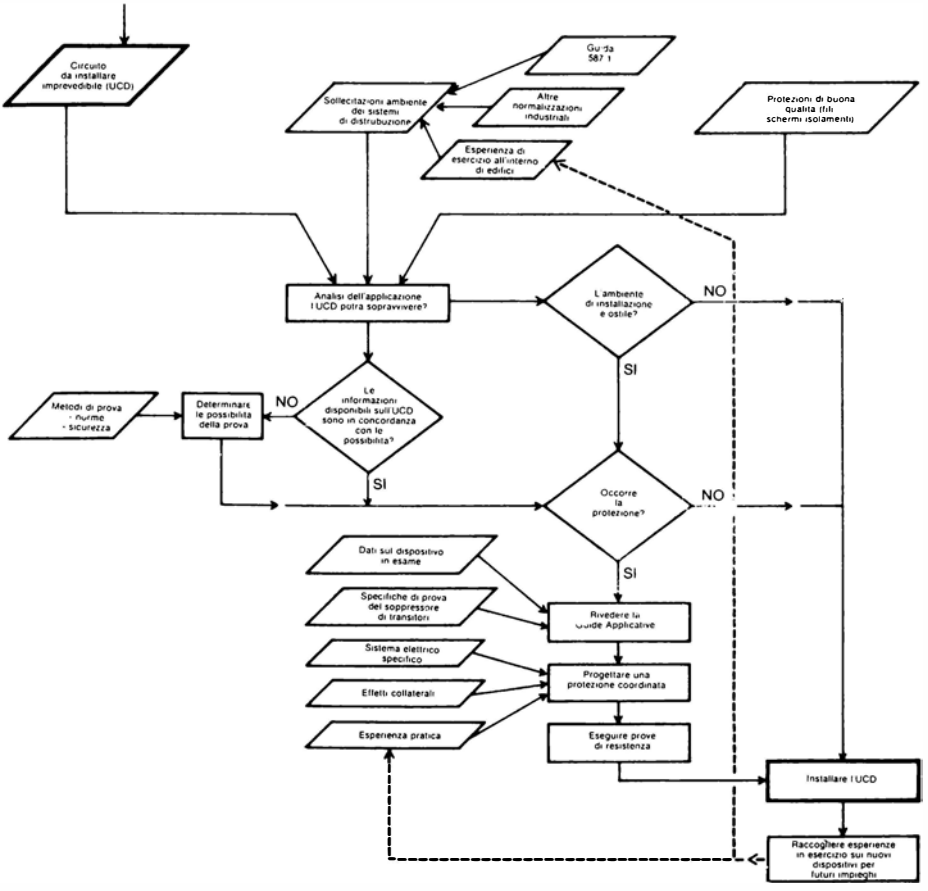


Figura 5 - Coordinazione degli schemi di protezione

fondamentali aventi diverse tensioni a circuito aperto e diverse correnti di cortocircuito, possono rappresentare la maggioranza dei transitori che avvengono negli impianti di distribuzione domestici, commericali o nell'industria leggera, con tensioni che arrivano fino a 600 Veff.

Ad un un'unica e semplice linea di condotta ci potranno essere delle eccezioni, ma queste eccezioni nulla sottraggono ai benefici che ci si potranno attendere da un'unificazione ragionevolmente valida nel definire la sollecitazione degli impianti. Le onde di prova di forme diverse potranno essere adatte per altri scopi e la Guida non dovrebbe imporle dove esse non siano applicabili. La prossima pubblicazione della Guida Applicativa fornirà maggiori particolari sulle forme d'onda destinate alle specifiche applicazioni.

La procedura usata nella Guida Applicativa sarà di confrontare le caratteristiche note dell'ambiente come definite nella Guida delle tensioni transitorie con la capacità nota (o da determinare) del circuito formante il carico a resistere senza protezione al suddetto ambiente. Mediante un processo sistematico di analisi e/o prove, usando per esempio il concetto di controllo del livello dei transitori[9)], l'utente sarà in grado di determinare se occorra o meno la protezione, quale sia la necessaria coordinazione, e quali compromessi siano da stabilire tra economica e prestazioni. La figura 5 mostra un diagramma di flusso che potrà guidarci in questo processo di scelta.

Il Gruppo di lavoro, in coordinazione con altre organizzazioni interessate, progredirà nella preparazione di questa Guida Applicativa; il gruppo di lavoro gradirà commenti e suggerimenti.

BIBLIOGRAFIA

1. *Guide on Surge Voltages, in AC Power Circuits Rates Up to 600V*, Final Draft, May 1979. Document prepared by Working Group 3.4.4. of the Surge Protective Devices Committee of the Power Engineering Society, Institute of Electrical and Electronics Engineers (New IEEE Standard 587-1980).
2. *Guide for Surge Withstand Capability (SWC) Tests,* ANSI Standard C37.90a, 1974; IEEE Standard 472-1974.
3. *Surge Arrestors for Alternating-Current Power Circuits,* IEEE Standard 28-1974; ANSI Standard C62.1-1975; IEC Standard 99-2.
4. Lenz, J.E., "Basic Impulse Insulation Levels of Mercury Lamp Ballast for Outdoor Applications", *Illuminating Engrg.,* February 1964, pp. 133-140.
5. Martzloff, F.D. and G.J. Hahn, "Surge Voltage in Residential and Industrial Power Circuits", *IEEE PAS-89,* 6, July/August 1970, 1049-1056.
6. Bull, J.H., "Impedance on the Supply Mains at Radio Frequencies", *Proceedings of 1st Symposium on EMC,* 75CH1012-4 Mont., Montreux, May 1975.
7. Martzloff, F.D. and F.A. Fisher, "Transient Control Level Philosophy and Implementation: The Reasoning Behind the Philosophy", *Proceedings 2nd Symposium on EMC,* 77CH1224-5EMC, Montreux, June 1977.
8. *Insulation Coordination Within Low-Voltage Systems Including Clearances and Creepage Distances for Equipment,* International Electrotechnical Commission Report 664.
9. Fisher, F.A. and F.D. Martzoloff, "Transient Control Levels, a Proposal for Insulation Coordination in Low-Voltage Systems", *IEEE PAS-95,* 1, January-/February 1976, pp. 120-129.

RINGRAZIAMENTI

I concetti presentati in questa relazione hanno ricavato un grande beneficio dalle consapevoli domande e dalle discussioni dei membri del "Gruppo di lavoro tensioni transitorie nei circuiti di distribuzione in c.a. a 600 V o meno" e dei critici interessati; particolare apprezzamento vada alle efficaci critiche di Catharine Fisher e Peter Richman. I dati usati nella compilazione della Guida hanno ricevuto un grande contributo da parte dei Laboratori Bell Telephone e della Landis & Gyr, Inc. Il diagrama di flusso che indica lo schema della Guida applicativa, si deve ad un suggerimento di Paul Speranza.

CAPITOLO 2

LA SOPPRESSIONE DEI TRANSITORI DISPOSITIVI E TEORIA

Questo capitolo presenta una breve descrizione dei soppressori di transitori disponibili e del loro funzionamento ed inoltre spiega come si possono applicare questi componenti.

2.1 I DISPOSITIVI PER LA SOPPRESSIONE DEI TRANSITORI

Da un punto di vista generale i soppressori dei fenomeni transitori si possono dividere in due categorie: a) quelli che attenuano i transitori impedendone la propagazione verso il circuito sensibile; b) quelli che deviano il transitorio dai carichi sensibili e limitano in questo modo le tensioni residue.

L'attenuazione di un transitorio, ossia l'azione di trattenerlo dal propagarsi fuori dal suo generatore oppure di impedirgli di entrare in un carico ad esso ricettivo, si ottiene mediante filtri inseriti in un circuito. Il filtro è di solito un passabasso e

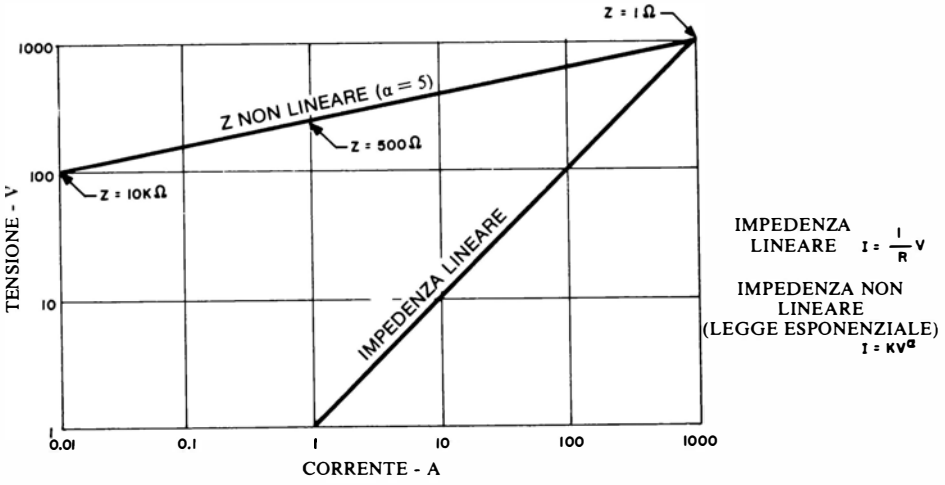


Figura 2.1 - Caratteristica tensione/corrente per una resistenza lineare da 1 ohm e per un varistor non lineare.

attenua i transitori (alte frequenze) permettendo al segnale od all'energia elettrica (bassa frequenza) di proseguire indisturbati.

La deviazione di un transitorio può essere ottenuta mediante un dispositivo capace di effettuare una tosatura dei picchi di tensione, oppure con un dispositivo tipo "barra di blocco" (Crowbar). Il progetto di questi due tipi, nonché il loro funzionamento e le loro applicazioni, sono sufficientemente diversi da richiedere una breve descrizione di entrambi in termini generici. Una descrizione più particolareggiata seguirà più avanti in questo Capitolo.

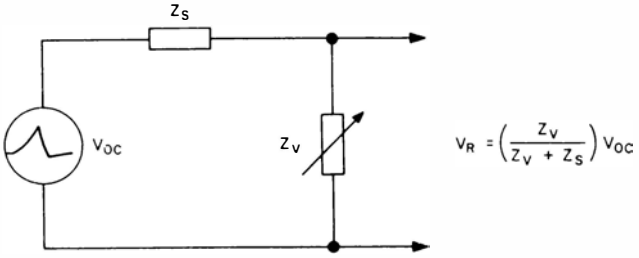


Figura 2.2 - Partitore di tensione con soppressore ad impedenza variabile.

Un dispositivo di tosatura dei picchi è un componente che ha un'impedenza variabile a seconda della corrente che passa attraverso esso oppure della tensione applicata a suoi terminali. Questi dispositivi hanno una caratteristica dell'impedenza non lineare, tuttavia è applicabile la legge di Ohm: basta che si consideri R una variabile dell'equazione. La variazione dell'impedenza è monotonica: in altre parole essa non contiene discontinuità, al contrario del dispositivo crowbar, che mostra un'azione di chiusura del circuito. La caratteristica V-A di questi dispositivi livellatori è in qualche modo dipendente dal tempo, ma essi non provocano un ritardo temporale come succede nella scarica attraverso uno spinterometro o nell'avviamento di un tiristor.

Con un dispositivo di livellamento dei picchi il circuito non è influenzato dalla presenza del componente né prima né dopo il transitorio e per qualsiasi tensione di esercizio che sia al di sotto del livello di tosatura. L'azione di tosatura di tensione deriva dall'aumento del drenaggio di corrente attraverso il componente quando la tensione tende ad aumentare. Se questo aumento di corrente è più veloce dell'aumento di tensione, l'impedenza del componente non è lineare (Figura 2.1). La "tosatura" apparente della tensione ha origine dall'aumento della caduta di tensione (IR) nell'impedenza del generatore a causa dell'aumento della corrente. Si può chiaramente comprendere che il dispositivo produrrà un livellamento che dipende dall'impedenza del generatore. Si può immaginare il funzionamento come divisore di tensione il cui rapporto non è costante ma varia. Se però l'impedenza del generatore è molto bassa, anche il rapporto sarà basso. Il soppressore non potrà

funzionare bene all'impedenza limite zero del generatore (Figura 2.2), funziona meglio se può essere instaurata una funzione di partitore di tensione.

I dispositivi tipo crowbar dimostrano un'azione di commutazione, sia che si tratti della scarica tra due elettrodi immersi in un gas che del passaggio in conduzione di un tiristor. Dopo la commutazione in conduzione essi presentano un'impedenza bassissima che fa deviare il transitorio fuori dal carico collegato in parallelo.

Dispositivi di questo tipo sono soggetti a due limitazioni: la prima consiste nel loro tempo di ritardo (di solito nell'ordine dei microsecondi) che lascia il carico senza protezione all'inizio del fianco di salita dell'impulso. La seconda limitazione è che una certa corrente proveniente dal generatore della tensione normale seguirà la scarica impulsiva (si chiama "corrente residua" o "potenza residua"). Nei circuiti in alternata questa corrente potrà o meno essere cancellata fino ad una corrente naturale zero; nei circuiti in continua la cancellazione è molto più improbabile. Se quindi il dispositivo crowbar non è progettato per ottenere un'azione di autointerruzione entro specifici limiti di energia di sovraccarico, di tensione del sistema e di corrente residua, occorre prevedere dei sistemi supplementari atti ad aprire il circuito di potenza.

2.1.1 Filtri

Le componenti di frequenza di un fenomeno transitorio sono superiori di vari ordini di grandezza rispetto alla frequenza di linea di un circuito in alternata ed, a maggior ragione, di un circuito in continua. Quindi una soluzione ovvia consiste nell'installare un filtro passabasso tra la sorgente del transitorio ed il carico che ne potrebbe essere disturbato.

Il tipo più semplice di filtro consiste in un condensatore sistemato in parallelo alla linea. L'impedenza del condensatore forma un partitore di tensione con l'impedenza del generatore e si ha quindi un'attenuazione delle componenti ad alta frequenza del transitorio. Questa semplice soluzione potrebbe avere degli effetti collaterali indesiderabili come: a) risonanze parassite con le componenti induttive presenti in altre parti del circuito, che produrranno delle elevate tensioni di picco; b) elevate correnti a raffica durante la commutazione oppure, c) eccesso di carico reattivo presentato alla tensione di alimentazione del sistema. Questi effetti non voluti si potranno ridurre montando una resistenza in serie, da cui il diffusissimo impiego degli smorzatori e dei circuiti di soppressione RC. Il prezzo da pagare per l'inserzione della resistenza supplementare è una minor efficacia della soppressione.

Oltre al semplice circuito RC, vengono anche largamente impiegati per la soppressione dei disturbi dei filtri convenzionali provvisti di induttanze e condensatori. Il loro uso offre in più un'efficace protezione dai transitori, basta che i componenti d'ingresso del filtro siano capaci di resistere alle alte tensioni che li accompagnano.

Quando l'origine dei transitori è ignota esiste una limitazione fondamentale

all'uso dei condensatori e dei filtri per la protezione. Si tratta del comportamento non lineare del condensatore rispetto alla frequenza, mentre la dipendenza dalla corrente è ancora lineare.

Nel Capitolo 1 è stato spiegato che, per progettare uno schema di protezione contro i transitori casuali, è spesso necessario fare una supposizione riguardante le caratteristiche del disturbo in arrivo. Se in questi presupposti si è fatto un errore circa l'impedenza del generatore o la tensione a circuito aperto, le conseguenze che colpiranno un soppressore lineare ed uno non lineare, differiscono tra loro in modo drammatico, come dimostrato dallo specchietto che segue.

L'esempio calcolato nel riquadro dimostra che una variazione dell'impedenza di generatore dai previsti 50 Ω a 5 Ω può provocare una variazione della tensione di protezione di un normale soppressore lineare da 414 V a 1850 V. Con un normale soppressore non lineare il relativo cambiamento va solamente da 330 V a 450 V. In altre parole si ottiene con un soppressore non lineare una variazione del 21 % soltanto, nel livello di protezione, anche per un errore di 10 a 1 nella previsione dei parametri del transitorio, di fronte alla variazione del 447 % che si ha con il medesimo errore usando un condensatore lineare. I dispositivi limitatori non lineari hanno le minime tensioni di limitazione, per cui la protezione ai transitori sarà la migliore possibile.

2.1.2 Dispositivi crowbar

Questa categoria di soppressori, basata principalmente sui tubi a gas (detti anche "scaricatori") oppure su sistemi di protezione a blocchetti di grafite, è largamente impiegata nel campo delle comunicazioni dove il problema della corrente residua è minore rispetto ai circuiti di potenza. Un'altra versione di questi soppressori consiste in circuiti ibridi che usano componenti a stato solido o di tipo ionico: questi vengono mandati in conduzione da un circuito di controllo.

Un dispositivo crowbar cortocircuita in pratica l'alta tensione verso terra. Questo cortocircuito continuerà fino a quando non si provveda ad abbassare il livello della corrente. Un dispositivo livellatore dei picchi di tensione non ridurrà mai la tensione di linea a valori inferiori al normale, cosa che spesso avviene con il crowbar. Dato che la tensione (sull'arco o per caduta diretta) viene mantenuta molto bassa durante la scarica, il soppressore deve poter portare delle correnti piuttosto forti senza dissipare entro di sé troppa energia. Questa possibilità costituisce il più evidente vantaggio di questi soppressori; vantaggio che viene però pagato con due limitazioni:

Risposta Tensione-Tempo. Quando la tensione cresce nell'intervallo di scintillazione, non può aver luogo una conduzione apprezzabile fino a quando non si stabilisce l'arco dovuto alla scarica a valanga nel gas che separa gli elettrodi. Questo ritardo, che di norma ha il valore di microsecondi, lascia il carico senza protezione durante l'inizio del fianco di salita dell'impulso.

UN CONFRONTO SEMPLIFICATO TRA LA PROTEZIONE CON DISPOSITIVI DI SOPPRESSIONE LINEARI E NON LINEARI

Supponiamo che la tensione a circuito aperto sia di 3000 V (vedi Figura 2.2):

1. Se l'impedenza del generatore è $Z_s = 50\ \Omega$,
   con un'impedenza del soppressore $Z_v = 8\ \Omega$,
   la corrente prevista è:

$$I = \frac{3000}{50 + 8} = 51{,}7 \text{ A e } V_R = 8 \times 51{,}7 = 414 \text{ V}$$

   La tensione massima che appare ai capi di un tipico varistor non lineare, il V130LA20A è 330 V a 51,7 A.

Si osservi che:

$$\begin{aligned} Z_s \times I &= 50 \times 51{,}7 &&= 2586 \text{ V} \\ V_R \times I &= 8 \times 51{,}7 &&= \underline{\ 414 \text{ V}} \\ & &&= 3000 \text{ V} \end{aligned}$$

2. Se l'impedenza del generatore è di soli 5 Ω (si ammette un errore di 10:1 nell'assorbimento), la tensione ai capi del medesimo soppressore linare da 8 Ω diventerà:

$$V_R = 3000 \frac{8}{5 + 8} = 1850 \text{ V}$$

   Però un varistor non lineare ha un'impedenza molto inferiore. Ora, per iterazione dalla curva caratteristica, vediamo cosa succede con 400 V a 500 A, un valore giusto per il V130LA20A:

   Per provare la correttezza, della nostra ipotesi, calcoliamo I:

$$I = \frac{3000 - 400\text{ V}}{5} = 520 \text{ A} \qquad \begin{aligned} Z_s \times I &= 5 \times 520 = 2600 \text{ V} \\ V_C &= \underline{\ 400 \text{ V}} \\ &= 3000 \text{ V} \end{aligned}$$

   che giustifica il valore di 500 A scelto come ipotesi ragionevole.*

Sommario

TENSIONI TRANSITORIE A "CIRCUITO APERTO" DI 3000 V

Livello di protezione ottenuto	Impedenza di generatore assunta	
	50 Ω	5 Ω
Lineare 8 Ω	414 V	1850 V
Varistor non lineare	330 V	400 V

Calcoli analoghi si possono fare, e le conclusioni saranno dello stesso tenore, per un errore prefissato nella tensione a circuito aperto, e con l'impedenza del generatore fissa. In questo caso il dispositivo lineare è ancora più suscettibile ad un errore di impostazione. Lasciamo questi calcoli al lettore interessato.

* Un'ipotesi ragionata oppure il risultato di un'iterazione: vedi più avanti in questo manuale, "il progetto con i varistori GE-MOV", II Capitolo 4.

Dato che il processo ha natura statistica ci sarà una notevole variazione della tensione d'arco che si avrà nei diversi interventi. Per alcuni dispositivi, questa tensione d'arco può aumentare di parecchio dopo un lungo periodo di inattività rispetto a quella che si stabilisce dopo una sequenza di scariche. A motivo della natura fisica del processo è difficile produrre consistenti tensioni d'arco alle basse tensioni d'esercizio. La difficoltà si assomma agli effetti delle tolleranze di lavorazione quando si tratta di spinterometri a piccola distanza interelettrodica. Un sistema per ovviare a queste difficoltà consiste nel riempire il tubo con un gas che abbia una tensione di carica inferiore a quella dell'aria. Questa sostituzione crea però dei problemi di affidabilità quando la chiusura del tubo non è più stagna ed il gas viene sostituito dall'aria. Per molte applicazioni occorre prevedere un secondo scaricatore in parallelo al primo, che abbia una tensione di scarica leggermente superiore: questo servirà da riserva in caso di rottura del primo.

Passaggio di corrente residua. La seconda limitazione è che dopo la scarica dovuta al transitorio seguirà un passaggio di corrente alimentata dalla normale tensione di linea (la "corrente residua"). Nei circuiti in alternata, questa corrente residua potrà o meno essere interrotta ad uno zero naturale di corrente; nei circuiti in corrente continua l'interruzione è sempre più incerta. Di conseguenza, se il dispositivo crowbar non è progettato in modo da garantire l'autospegnimento entro dati limiti di energia di picco, di tensione del sistema e di corrente residua, si deve pensare ad un sistema aggiuntivo atto ad aprire il circuito principale.

2.1.3 Dispositivi limitatori di tensione

Per adempiere alla funzione di limitatore di tensione, i dispositivi descritti all'inizio di questo capitolo si basano sulla loro impedenza non lineare in unione all'impedenza del generatore del disturbo. Sono stati usati tre tipi di dispositivi: raddrizzatori al Selenio invertiti, diodi a valanga (zener) e varistori composti da materiali diversi come carburo di silicio, ossido di zinco, eccetera.[1]

Le celle al selenio. I soppressori di transitori al selenio fanno uso della tecnologia dei raddrizzatori al selenio unita ad uno speciale trattamento che permette la scarica inversa ad alti livelli di energia, senza che si abbia un danneggiamento della struttura policristallina. Queste celle sono costruite depositando gli elementi semiconduttori sulla superficie di una piastra metallica di substrato che possa fornire una buona massa termica ed una buona dissipazione di energia. Alcuni di questi elementi hanno proprietà autorigeneranti, in modo da poter sopravvivere a scariche con energia superiore a quella prescritta per un numero limitato di interventi, e questa caratteristica è molto proficua, anche se non "legale", nell'incerto mondo dei transitori di tensione.

Le celle al selenio non hanno però le possibilità di limitazione dei più moderni varistori ad ossidi metallici, oppure dei diodi a valanga. Di conseguenza il loro campo di applicazione si è alquanto ristretto.

I diodi Zener. La tecnologia dei raddrizzatori al silicio ha migliorato le prestazioni dei diodi zener per regolazione, nell'intento di arrivare a progettare dei diodi del tipo a valanga destinati alla soppressione dei transitori. Il più grande vantaggio di questo tipo di diodi è il loro effetto di limitazione, che avviene nel vero senso della parola, ad una tensione che si approssima benissimo a un valore ideale unico e costante. Questi elementi sono anche disponibili per basse tensioni.

Dato che i diodi mantengono la tensione di valanga su di una piccola superficie della giunzione durante la scarica del picco, si avrà lo sviluppo di un notevole calore in un piccolo volume. Il limite più importante di questi dispositivi è la ridotta possibilità di dissipare energia.

I varistori. Un varistor è una resistenza variabile non lineare. La relazione tra la corrente I che passa nel componente, e la tensione V che si stabilisce ai suoi capi è definita quasi sempre da una legge esponenziale: $I = kV^{\alpha}$. Si potranno derivare delle equazioni più precise e più complete, in relazione alle proprietà fisiche del componente,[2,3] ma per il momento questa definizione sarà sufficiente. Una trattazione più completa verrà fatta nel Capitolo 3.

Il termine α (alfa) dell'equazione rappresenta la non linearità della conduzione. Una resistenza lineare ha $\alpha = 1$. Tanto maggiore è α, tanto migliore è l'effetto di limitazione, e questo spiega il fatto che talvolta α è usato come cifra di merito. È evidente che i fabbricanti di varistori tendono costantemente ad ottenere valori di α sempre più grandi.

Il carburo di silicio. Fino a poco tempo fa, il tipo più diffuso di varistor era composto da carburo di silicio trattato in modo speciale. Questo materiale ha avuto, ed ha tuttora una vasta applicazione nei dissipatori di transitori ad elevata potenza ed alta tensione. Il valore piuttosto basso di α in questo materiale porta però a una di queste due conseguenze. Una è che il livello di intervento della protezione è troppo alto per un dispositivo capace di resistere alla tensione di linea. L'altra è che, per un elemento capace di stabilire un livello di protezione accettabile, si avrà un drenaggio eccessivo di corrente alla tensione di esercizio, in caso di collegamento in parallelo alla linea. Occorre quindi prevedere un'interruzione in serie, onde impedire il passaggio di corrente alla tensione normale.

Una trattazione particolareggiata delle combinazioni tra interruzioni in serie e blocchi di carburo va oltre i limiti di questo manuale, ma in ogni caso sono disponibili molti testi e normalizzazioni che riguardano il progetto, la prova e le applicazioni di questi scaricatori.[4,5]

Nei circuiti elettronici a bassa tensione, i varistori al carburo di silicio non hanno avuto un impiego molto esteso a causa della necessità dell'*interruzione in serie*, che produce un aumento dei costi finali e riproduce molte delle caratteristiche negative degli scaricatori a spinterometro descritti in precedenza. Questi varistori sono stati però usati come resistenze limitatrici di corrente atte ad aiutare l'interruzione delle correnti residue in alcuni scaricatori ad arco.

I varistori ad ossidi metallici. Numerosi recenti progressi[6,7] hanno dato origine ad una nuova famiglia di varistori fatti di ossidi metallici sinterizzati, principalmente ossido di zinco con opportuni addittivi. Questi nuovi varistori hanno valori di α molto più alti rispetto a quelli al carburo di silicio: questi valori stanno di solito in un campo che va da 15 a 30, e si tratta di valori effettivi misurati su un vasto intervallo di correnti impulsive. Un tipo di varistor, il GE-MOV® II della General Electric, verrà descritto molto particolareggiatamente nel Capitolo 3. Per il momento si limiterà la descrizione a quanto occorre per capire il discorso che si fa in questo capitolo, riguardante le applicazioni nel campo della soppressione dei transitori.

Gli alti valori dell'esponente che manifestano i varistori ad ossidi metallici hanno dischiuso un campo di impieghi completamente nuovo, a bassa tensione di protezione e bassa corrente dispersa. Le possibilità di applicazione si estendono dall'elettronica di bassa potenza ai più grandi scaricatori di servizio. Però in questo manuale si metterà principalmente l'accento sulle tensioni di esercizio inferiori ai 1000 V efficaci e sulle energie di transitorio inferiori ai 1000 J. Maggiori tensioni si possono agevolmente ottenere mettendo in serie diversi elementi. Non si può però ottenere un aumento della corrente ricorrendo al collegamento in parallelo, senza provvedere ad un'attenta selezione delle caratteristiche dei vari componenti, che dovranno essere il più possibile uguali. Al limite inferiore della scala delle tensioni, i varistori ad ossido metallico, allo stato attuale della tecnica, si limitano a 10 V eff.

Le caratteristiche strutturali dei varistori ad ossido metallico non possono fare a meno di dare origine ad una notevole capacità tra i terminali; questa capacità dipende dalla superficie, dallo spessore e dal trattamento del materiale. Per la maggior parte delle applicazioni di potenza questa capacità non è rilevante. Ma nelle applicazioni ad alta frequenza se ne deve prendere in considerazione l'effetto nella progettazione generale.

2.2 CONFRONTO TRA I DIVERSI SOPPRESSORI DI TRANSITORI

A causa della diversità delle caratteristiche e delle specifiche non unificate dei costruttori, i soppressori di transitori non si possono agevolmente confrontare tra loro. Un grafico (Figura 2.3) mostra le caratteristiche relative tensione-corrente dei quattro componenti più diffusi destinati all'uso in circuiti a corrente alternata con tensione di 120 V. Per riferimento è rappresentata anche la curva di una semplice resistenza dinamica. Si può osservare che con l'aumento del fattore alfa, diminuisce la pendenza della curva tensione-corrente approssimandosi sempre più a un andamento con tensione costante. Per le applicazioni di limitazione di tensione su estese gamme di corrente occorrono valori di alfa il più possibile elevati.

Bisogna anche conoscere l'assorbimento di energia del componente e le possibilità di assorbimento delle correnti di picco, qualora si vogliano fare dei confronti. La

tabella che segue comprende altri importanti parametri dei soppressori di uso più comune.

Potenza dissipata in condizioni di non intervento. È la potenza consumata dal soppressore alla normale tensione di linea: è un importante criterio di scelta. La corrente massima a riposo è uno dei fattori che determinano la potenza dissipata in regime di normalità da un soppressore. Questa potenza dipende anche dalla

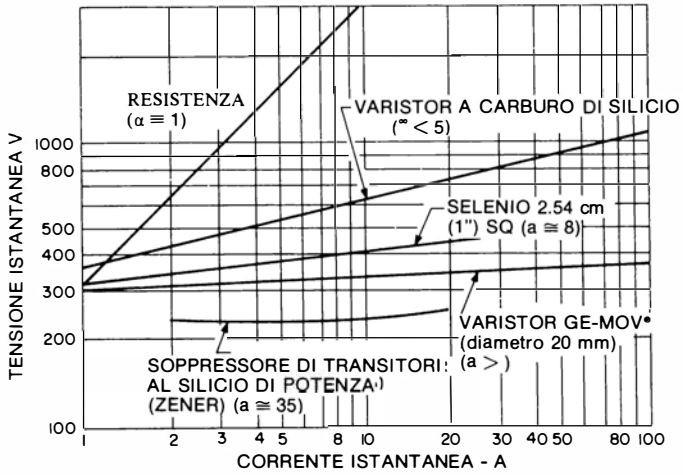


Figura 2.3 - Caratteristiche V-I di quattro soppressori di transitori.

TABELLA 2.1: CARATTERISTICHE DEI SOPPRESSORI

TIPO DEL SOPPRESSORE	CORRENTE DISPERSA mA	CORRENTE DI PICCO @ 1 ms A	POTENZA DI PICCO @ 1 ms kW	ENERGIA DI PICCO JOULE	RAPPORTO DI LIMITAZIONE DI TENSIONE @ 10 A	CAMPO DI TENSIONE CONTINUA
Varistor GE-MOV® II (diametro 20 mm)	1	120	40	70	1,7	14-1200
Zener (1 W)	0,005	5,5	1,5	2	1,65	5-200
Selenio (2,54 x 2,54 mm)	12	30	9	9	2,3	35-700
Scaricatore a spinterometro		> 500			2,4-8,8*	90-1400
Varisotor al carburo di silicio (diametro 19 mm)	5			50	4,6	15-300

* Campo della tensione d'arco ad 1 kV/μs, in seguito si abbassa a < 1.

caratteristica alfa del componente. Tanto per fare un esempio, il soppressore al selenio della tabella 2.1 ha una corrente dispersa di 12 mA ed un alfa di 8 (Figura 2.3). Esso ha quindi una dissipazione in regime normale di circa 0,5 W se posto su una linea a 120 V eff. (170 V di picco). Un soppressore a diodio Zener ha una dispersione di potenza in regime normale di meno di un milliwatt. Un varistor al carburo di silicio dal diametro di 19 mm ha una dispersione che si aggira sui 200 mW. Nei componenti a basso alfa è necessaria una notevole potenza dispersa per garantire una limitazione ragionevole alle maggiori correnti.

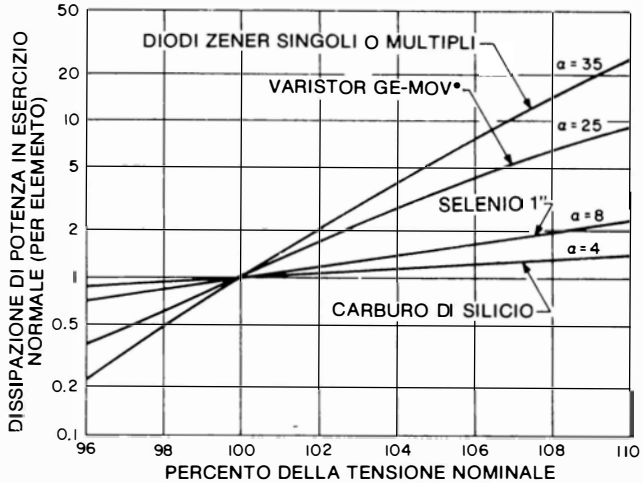


Figura 2.4 - I cambiamenti nella potenza in regime normale sono considerevolmente maggiori quando l'alfa del soppressore è alto.

La quantità di potenza dispersa a vuoto che un circuito può tollerare può costituire un fattore decisivo nella scelta del soppressore. Per quanto i componenti ad alfa elevato abbiano una bassa dispersione alla tensione nominale di progetto, un piccolo aumento della tensione di linea provocherà un drammatico aumento della dispersione. In Figura 2.4 si può osservare questo fenomeno per un soppressore a diodo zener: un aumento di tensione del 10% rispetto al valore di esercizio aumenta la potenza dispersa di un fattore 30. Invece nei dispositivi a basso alfa, come quelli al carburo di silicio, questo aumento è solo di 1,5 volte.

In Figura 2.5 si vedono delle tipiche curve tensione-tempo di scaricatori a gas, e queste mostrano una tensione di limitazione iniziale notevolmente alta. Uno scaricatore a gas non passa in conduzione se l'impulso transitorio non supera la tensione di scarica. In Figura 2.5 sono mostrati due normali valori del tasso di salita dell'impulso, ossia 1 kV/μs e 20 kV/μs. Quando si applica un picco di tensione, il dispositivo passa in conduzione in un punto che sta tra i limiti indicati. A 20 kV/μs lo scaricatore si accenderà tra 600 e 2500 V. Ad 1 kV/μs esso si accenderà tra 390 e 1500 V.

Quando viene usato per proteggere dai picchi le linee in alternata, lo scaricatore a gas può dare origine a correnti residue. Quando la tensione passa per lo zero alla fine di ciascun semiperiodo, l'arco si spegnerà, ma se gli elettrodi sono caldi ed il gas è ionizzato, esso potrà riprendere al semiperiodo successivo. Se la potenza sulla rete è sufficiente, questa corrente potrà danneggiare gli elettrodi. La corrente residua può essere ridotta installando una resistenza di limitazione in serie allo scaricatore, riducendo la corrente che lo attraversa, ma si paga lo scotto con un aumento della tensione di limitazione.

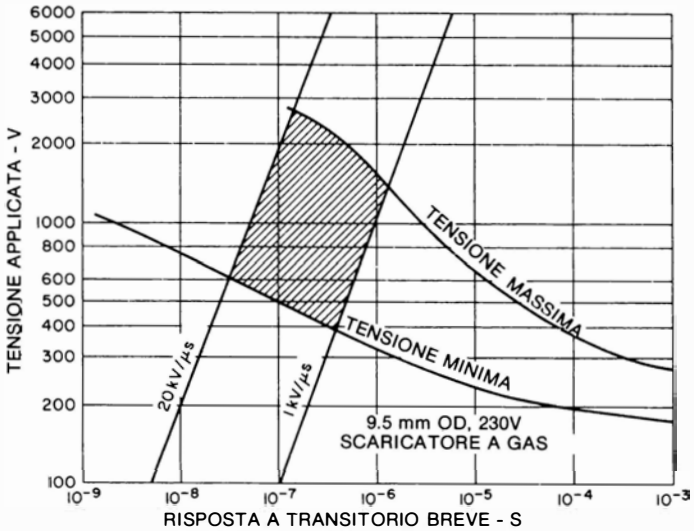


Figura 2.5 - Rottura per impulso di uno scaricatore a gas rispetto alla rapidità di salita della tensione e del valore assoluto della medesima.

Lo scaricatore a gas è molto utile per alti picchi di corrente, ma non è molto efficace nella protezione di circuiti a bassa tensione ed a bassa impedenza. Spesso è vantaggioso prevedere un altro sistema di protezione in aggiunta allo scaricatore, che provveda alla protezione dall'impulso iniziale. Sono possibili parecchie combinazioni ibride con un varistor oppure con un diodo a valanga. Nel progetto occore fare bene attenzione a dirigere la parte iniziale dell'impulso al componente a stato solido, deviando allo stesso tempo la parte successiva dell'impulso verso lo scaricatore a gas. Si devono anche prendere delle precauzioni contro le tensioni indotte nei fili adiacenti dai ripidi fronti di ascesa delle correnti che si accompagnano alle scintillazioni.

2.3 CONTROLLI DI FUNZIONALITA'

Dovrebbe essere assiomatica la necessità di considerare l'applicazione di dispositivi di protezione durante la fase di progetto di un sistema, ma l'evidenza storica

dimostra che non è così. L'applicazione dei sistemi protettivi in tempi successivi è quindi una pratica normale. In effetti si può considerare questa forma di aggiornamento come parte del processo di elaborazione del progetto, con ripetute correzioni in un'impostazione di rischio calcolato. Potrebbe essere giustificabile installare qualche apparecchiatura con protezione ridotta al minimo nell'aspro mondo esterno, e più tardi, qualora se ne ravvisi la necessità, intraprendere un'azione correttiva. L'aggiornamento dovrebbe essere perciò il risultato di una scelta documentata e non avere origine da una necessità imprevista. Anche in questo caso occorreranno alcune forme di controllo di funzionalità, per assicurarsi che la modifica possa raggiungere lo scopo prefisso.

La natura dell'ambiente produttore di disturbi deve essere esaminata quando si voglia applicare un aggiornamento. Si tratta di alcune conoscenze concrete dell'argomento, come quelle trattate nel Capitolo 1, ma anche di alcune "generalizzazioni" che tuttora aspettano conferma. Le norme di prova e le specifiche diventano quindi delle guide molto utili nel caso che esse non siano applicate oppure applicate in modo incongruo.[8]

Alcune norme di collaudo mettono l'accento sulle prove alla *tensione*. Questo è naturale per il fatto che, storicamente, la maggior causa di guasti negli impianti elettrici ha avuto origine in perforazioni dell'isolamento dovute ad eccesso di tensione. Si possono quindi proporre alcune prove di tensione alle quali gli impianti devono resistere senza che avvengano scariche. Bisogna però dire che, esistendo adatti dispositivi di protezione già compresi entro una "scatola nera" elettronica, una semplice prova di tensione non avrà molto significato. Quello che occorre è l'impostazione a due passi di cui si parlerà in seguito, nella quale si determina per prima cosa la tensione ammessa dal dispositivo di protezione e quindi si definiscono gli effetti sui componenti a valle. Il concetto chiave è la *coordinazione*.

Quando si prescrive o si stabilisce una prova occorre sempre ricordare la differenza che esiste tra una prova alla *tensione* ed una prova alla *corrente*.

Provando la capacità di resistenza alla tensione di un dispositivo bisogna osservare bene quale sia l'impedenza dell'apparecchio da provare e se esso contiene, o meno, dei soppressori di transitori. Dovrebbe essere ovvia la necessità di non prescrivere una prova in tensione e quindi dar di manovella al generatore fino a raggiungere la tensione di prova mantenendola costante ai morsetti della scatola nera che contiene un soppressore. Può non sembrare vero, ma qualcuno ci ha provato!

Viceversa, l'applicazione di una prova in tensione ad una scatola nera che contenga un soppressore perderà ogni significato se l'impedenza del generatore di prova è troppo alta o troppo bassa. È più giusto, almeno allo stadio di progetto, separare le prove dalle fasi del medesimo. Per prima cosa si deve specificare il circuito di prova che servirà a verificare le prestazioni del soppressore: tensione a circuito aperto, (ampiezza e durata) ed impedenza del generatore. Con questo si

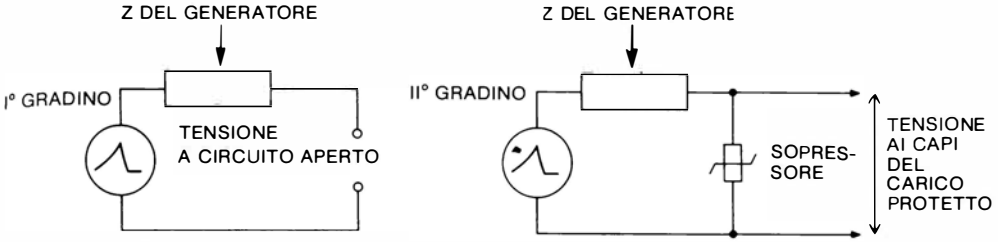


Figura 2.6 - Due passaggi per la valutazione delle necessità di protezione.

definirà la tensione di limitazione che si svilupperà ai capi del soppressore collegato in parallelo (Figura 2.6). In secondo luogo si progetterà il circuito protetto dimensionandolo per questa tensione di limitazione, prevedendo però degli adeguati margini. Dopo il progetto si potrà anche applicare questa impostazione a due passi per dimostrare che si è raggiunta la capacità di resistenza ai picchi.

Il Capitolo 7 fornisce informazioni dettagliate sulla prova dei varistori sia per la valutazione delle loro caratteristiche sia per eseguire dei collaudi che siano realistici.

BIBLIOGRAFIA

1. E.C. Sakshaug, J.S. Kresge and S.A. Miske, "A New Concept in Station Arrester Design," IEEE Trans. PAS-96, No. 2,647-656 (March-April 1977).
2. H.R. Philipp, L.M. Levinson, "Low Temperature Electrical Studies in Metal Oxide Varistors - A Clue to Conduction Mechanisms," Journal App. Physics, Vol. 48, 1621-1627 (April 1977).
3. H. R. Philipp, L.M. Levinson, "Zinc Oxide for Transient Suppression," IEEE Trans. PHP (December 1977).
4. Surge Arresters for Alternating Current Power Circuits ANSI Standard C62.1 (1975), IEEE Standard 28 (1974).
5. IEC Recommendation, 99-1 (1970) Lightning Arresters. Part I: Nonlinear Resistor Type Arresters for AC Systems
6. M. Matsuoka, T. Masuyama and Y. Iida, Supplementary Journal of Japanese Society of Applied Physics Vol. 39, 94-101 (1970).
7. J.D. Harnden, F.D. Martzloff, W.G. Morris and F.B. Golden, "Metal-Oxide Varistor: A New Way to Suppress Transients," Electronics (October 2, 1972).
8. F.D. Martzloff, "A Guideline on Transient Overvoltages in Low-Voltage AC Power Circuits," Report 77CRD221, General Electric Company, Schenectady, New York (1977).

CAPITOLO 3

I VARISTORI GE-MOV® II PROPRIETA' FONDAMENTALI, NOMENCLATURA E TEORIA

3.1 CHE COS'È UN VARISTOR GE-MOV® II

I varistori GE-MOV® II sono delle resistenze non lineari dipendenti dalla tensione che mostrano un comportamento elettrico simile a quello di due diodi Zener collegati in serie a polarità invertite. Le caratteristiche di scarica simmetriche e molto marcate che si vedono in Figura 3.1 fanno in modo che il varistor abbia delle eccellenti prestazioni nella soppressione dei transitori. Quando viene esposto a transitori ad alta tensione il varistor cambia la sua impedenza di molti ordini di grandezza che vanno da un circuito praticamente aperto ad un livello di elevata conduttività, mantenendo in questo modo il livello della tensione transitoria entro limiti di sicurezza. L'energia potenzialmente distruttiva del transitorio impulsivo all'ingresso viene assorbita dal varistor proteggendo i componenti vulnerabili del circuito.

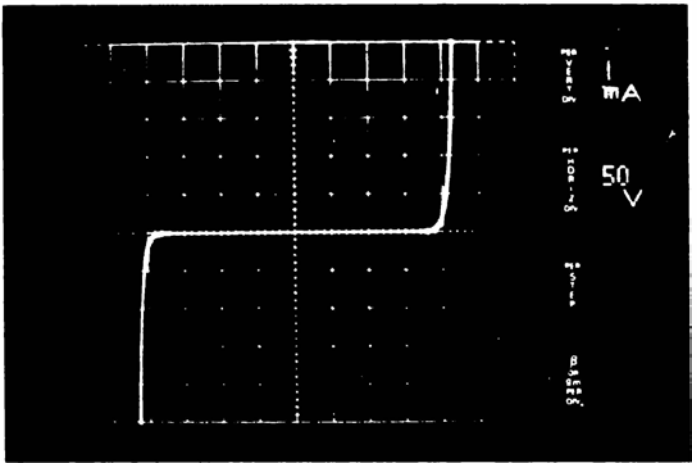
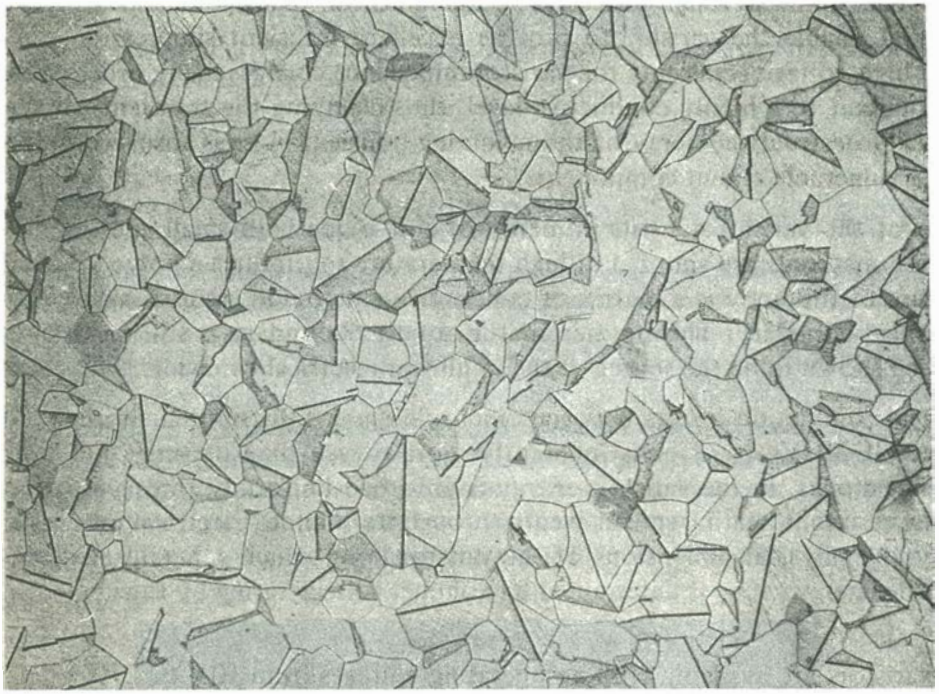


Figura 3.1 - Tipica caratteristica I-V di un varistor.

Il varistor è principalmente composto da ossido di zinco, con piccole aggiunte di ossidi di bismuto, cobalto, manganese ed altri ossidi metallici. La struttura della massa consiste in una matrice di granuli conduttori di ossido di zinco, separati da una massa intergranuale che presenta le caratteristiche delle giunzioni P-N dei semiconduttori. Questo legante è responsabile del blocco della conduzione alle basse tensioni, mentre favorisce la conduzione alle alte tensioni con legge non lineare.



100 μ

Figura 3.2 - Fotomicrografia ottica di una sezione lucidata ed attaccata di varistor GE-MOV®.

Dato che la conduzione elettrica avviene tra i granuli di ossido di zinco distribuiti nella massa del componente, il varistor GE-MOV® II è per la sua costituzione più resistente ai maltrattamenti delle sue controparti a giunzione singola P-N, come i diodi Zener. Nel varistor l'energia viene assorbita uniformemente nella massa del dispositivo e quindi il calore prodotto si sviluppa in tutto il suo volume. Le proprietà elettriche sono controllate in primo luogo dalle dimensioni fisiche del corpo del varistor che viene in genere sinterizzato in forma di disco. La prestazione energetica è determinata dal volume, quella in tensione dallo spessore o

dal percorso delle linee di corrente, mentre la dissipazione di corrente è definita dalla superficie misurata su una sezione perpendicolare delle linee di corrente.

I varistori GE-MOV® II sono disponibili con tensioni di funzionamento che vanno da 6 V a 2800 V. Tensioni maggiori trovano un limite solo nella possibilità di trovare un adatto contenitore. Le correnti passanti di picco superano i 5.000 A e la dissipazione di energia può superare i 6500 J per i componenti di maggiori dimen-

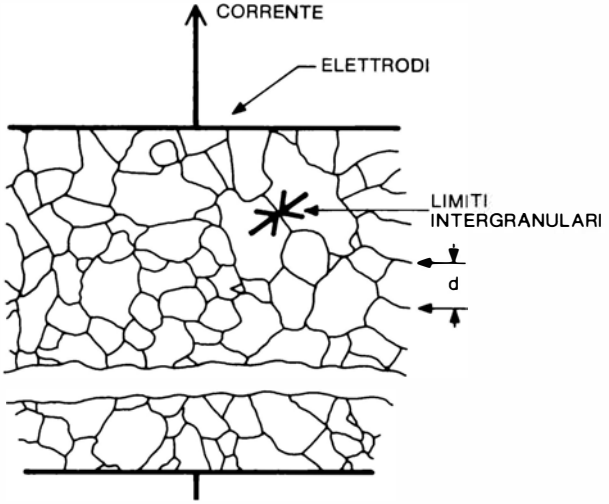


Figura 3.3 - Schizzo schematizzato della microstruttura di un varistor ad ossidi metallici. I granuli di ZnO conduttore (dalla dimensione media d) sono separati dai contorni intergranulari.

sioni. La forma degli involucri va dalla serie assiale predisposta per l'inserzione automatica fino ad arrivare alla serie di componenti molto robusti per alte energie.

3.2 CARATTERISTICHE FISICHE

3.2.1 Introduzione

Una proprietà molto simpatica del varistor ad ossidi metallici composto da ossido di Zinco (ZnO) è che le caratteristiche elettriche dipendono dall'intera massa del componente. Ogni granulo di ZnO presente nella ceramica agisce come se ci fosse una giunzione a semiconduttore che si estende all'intera sua superficie. Una sezione del materiale si vede in Figura 3.2 dove si può osservare la struttura microcristallina della ceramica. Si possono vedere molto bene i limiti dei singoli grani di ZnO. Dato che il comportamento elettrico non lineare avviene alle separazioni tra i singoli grani semiconduttori di ZnO, il varistor può essere considerato un

componente "poligiunzione" composto da moltissimi collegamenti in serie ed in parallelo tra le superfici dei granuli. Il comportamento di questo componente può essere analizzato riferendosi ai particolari delle microstruttura ceramica, in quanto le dimensioni dei grani e la distribuzione di queste dimensioni nella massa giocano un ruolo di punta nel comportamento elettrico.

3.2.2 Microstruttura del varistor

I varistori GE-MOV® II vengono formati pressando e sinterizzando delle polveri a base di ossido di zinco fino alla forma di dischi ceramici. Questi dischi sono quindi provvisti di elettrodi di Argento a film spesso per fornire delle superfici di contatto adatte alla saldatura. La massa del varistor che si trova tra i contatti è formata da grani di ossido di zinco di misura media *"d"*, come si vede nel modello schematico di Figura 3.3. La resistività dello ZnO è minore di 0,3 ohm-cm.

La progettazione di un varistor per una data tensione di scarica V_N, è fondamentalmente questione di scelta dello spessore del disco in modo che tra gli elettrodi si trovi un determinato numero n di granuli disposti in serie.

In termini pratici il materiale del varistor è caratterizzato da un gradiente di potenziale elettrico misurato lungo il suo spessore ed espresso in volt/mm. Controllando la composizione e le condizioni di fabbricazione, questo gradiente rimane stabile. Dato che esistono dei limiti pratici alle dimensioni ottenibili nel senso dello spessore, sarebbe auspicabile disporre di diversi valori del gradiente di tensione. Variando la composizione degli addittivi a base di ossidi metallici è possibile cambiare le dimensioni dei granuli (d) ed ottenere i risultati voluti.

Una delle proprietà fondamentali del varistor ad ossido di zinco è che la caduta tra le due facce di una singola separazione intercristallina rimane pressoché costante. Osservazioni compiute su di una serie di composizioni diverse e di differenti processi di fabbricazione, hanno dimostrato che la caduta di tensione rimane fissa a circa 2-3 V per ogni giunzione intergranulare. Inoltre questa caduta di tensione non cambia se variano le dimensioni dei granuli.

Ne consegue che la tensione del varistor sarà determinata dallo spessore del materiale e dalle dimensioni dei granuli di ZnO. La relazione può essere espressa molto semplicemente nel modo seguente:

	Tensione del varistor,	V_N	$= (3\ V)\ n$
dove,		n	= numero medio di separazioni intergranulari tra gli elettrodi
e,	spessore del varistor,	D	$= (n + 1)\ d$
			$\sim \dfrac{V_N \times d}{3}$
dove,		d	= dimensione media dei grani

La tensione V_N è definita come la tensione che si ha ai capi del varistor nel punto della caratteristica V-I in cui viene completata la transizione tra la regione lineare a bassa conduzione e quella ad alta non-linearità. Allo scopo di eseguire delle misure unificate, le è stata data arbitrariamente la definizione di tensione che si ha alla corrente di 1 mA.

Nella tabella che segue si forniscono alcuni tipici valori dimensionali per i varistori GE-MOV® II.

TENSIONE DEL VARISTOR	DIMENSIONE MEDIA DEI GRANULI	n	GRADIENTE	SPESSORE DEL DISCHETTO
VOLT	MICRON		V/mm ad 1 mA	mm
150 V C.C.	20	75	150	1,5
25 V C.C.	80*	12	33	1,0

* Formula per basse tensioni.

3.2.3 Teoria del funzionamento

Per la natura policristallina dei varistori a semiconduttore formato da ossidi metallici, il funzionamento fisico di questo dispositivo è più complesso di quello dei semiconduttori convenzionali. Un gran numero di misure hanno permesso di determinare la maggior parte delle caratteristiche elettriche di questi componenti, e continuano gli sforzi nell'intento di capire meglio il loro funzionamento. In questo paragrafo parleremo di alcune teorie di funzionamento, per quanto, dal punto di vista dell'utente, sia molto più importante capire quali siano le proprietà elettriche di base e come queste possano essere messe in relazione con la costruzione degli apparecchi.

La chiave per spiegare il funzionamento del varistor consiste nel comprendere i fenomeni elettronici che avvengono nelle separazioni intergranulari, ossia alle giunzioni tra i vari granuli di ossido di zinco. Mentre alcune vecchie teorie supponevano che si verificasse un effetto "tunnel" elettronico attraverso uno strato isolante di seconda fase esistente nelle separazioni intergranulari, il funzionamento del varistor si descrive probabilmente meglio immaginando uno schema di connessione in serie ed in parallelo di diodi a semiconduttore. In un modello di questo tipo, le separazioni intergranulari contengono dei difetti con elettroni liberi "trappola" provenienti dai granuli di ossido di zinco, che è un semiconduttore di tipo N; si forma in tal modo uno strato di svuotamento per carica spaziale nella zona dei granuli di ZnO adiacenti alle separazioni intergranulari [6].

In figura 3-4 appaiono evidenti gli strati di svuotamento nel varistor; si tratta di una curva che rappresenta l'andamento del reciproco del quadrato della capacità di una giunzione, rispetto alla tensione applicata alla separazione intercristallina [7]. Si

tratta dello stesso comportamento osservato nelle giunzioni a semiconduttore. La relazione è:

$$\frac{1}{C^2} = \frac{2\,(V_b + V)}{q\,\varepsilon\,S\,N}$$

Dove V_b è la tensione di barriera, V la tensione applicata, q la carica dell'elettrone, εS la permittività del semiconduttore ed N la densità dei portatori di carica. Da questa relazione si è potuta determinare la concentrazione di portatori di carica, N, ad un valore di circa 2×10^{17} per cm^3. [7] Si è inoltre calcolato lo spessore dello strato di svuotamento, pari a circa 1000 unità Angstrom. Anche lo studio di singole giunzioni conforta la teoria del diodo. [9]

Sono proprio questi strati di svuotamento che bloccano la libera circolazione dei portatori di carica e sono responsabili del basso isolamento elettrico nella regione delle correnti di dispersione, come appare dalla figura 3.7. La corrente di perdita è

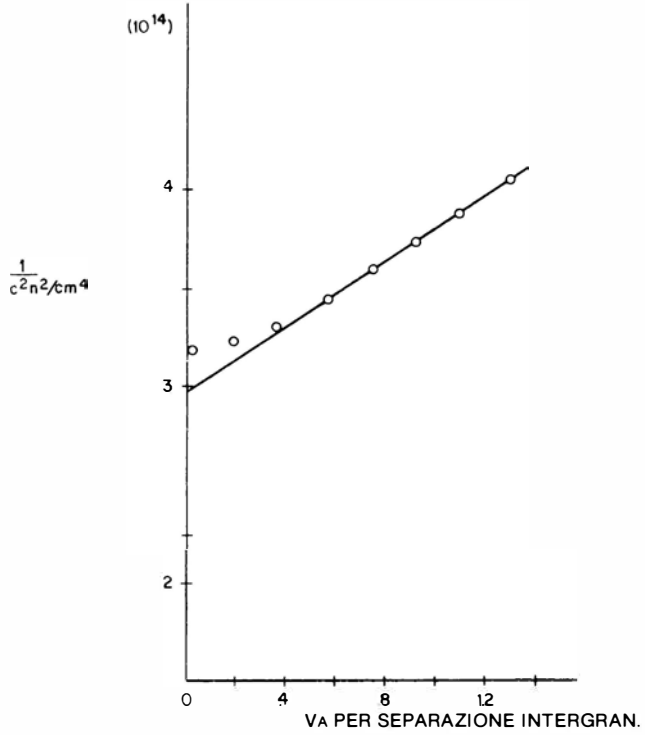


Figura 3.4 - La relazione tra capacità e tensione di un varistor GE-MOV II ricorda un diodo in polarizzazione inversa con giunzione a gradino. Nd ~ $2 \times 10^{17}/cm^3$.

dovuta alla libera circolazione delle cariche attraverso la barriera abbassata dal campo, ed è attivata dal calore, almeno a temperature superiori a 25°C.

La figura 3.5 mostra uno schema a bande energetiche per una giunzione tra ZnO - seperazione intergranulare - ZnO [11]. Il grano di sinistra è polarizzato in conduzione alla tensione V_L ed il lato destro ha una polarizzazione inversa V_R. Gli spessori degli

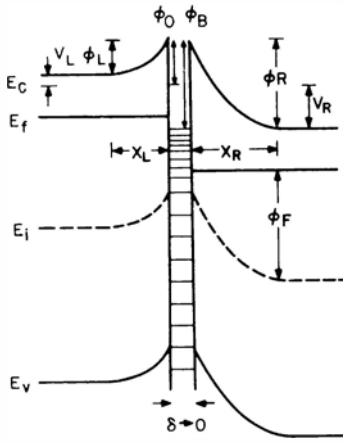


Figura 3.5 - Diagramma energetico a bande di una giunzione ZnO - separazione intergranulare - ZnO.

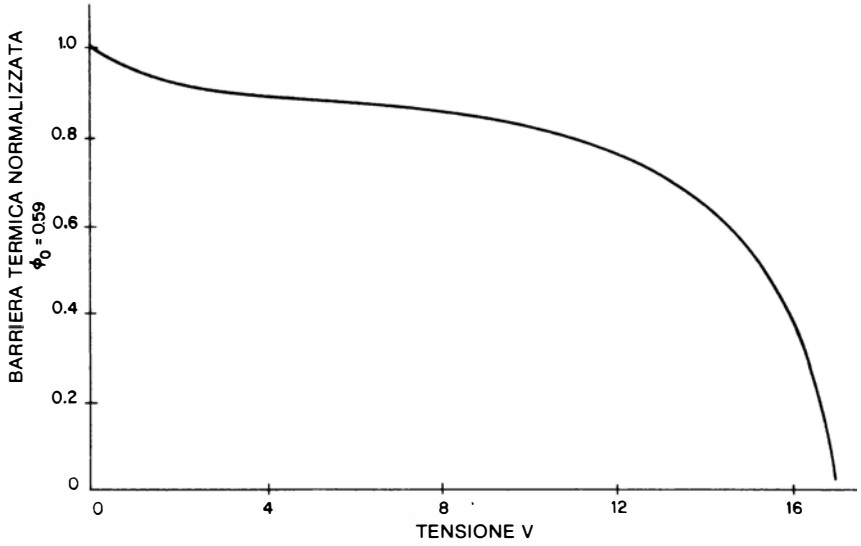


Figura 3.6 - Barriera termica in funzione della tensione applicata.

strati di svuotamento sono X_L ed X_R mentre le corrispondenti altezze di barriera sono Φ_L e Φ_R. L'altezza della barriera a polarizzazione zero è Φ_O. Quando aumenta la tensione di polarizzazione, Φ_L diminuisce e Φ_R aumenta, portando ad un abbassamento della barriera e ad un aumento della conduzione.

L'altezza della barriera Φ_L di un varistor a bassa tensione è stata misurata in funzione della tensione applicata (vedi riferimento 11), ed è rappresentata in figura 3.6. La rapida diminuzione della barriera alle alte tensioni rappresenta l'instaurarsi della conduzione non lineare. [12)]

I meccanismi di trasporto nella regione non lineare sono complicatissimi, e sono ancora oggetto di attive ricerche. La maggior parte delle teorie trae ispirazione dalla teoria del trasporto nei semiconduttori ed il lettore può rivolgersi alla bibliografia per maggiori informazioni.

Passiamo ora alla regione di conversione alla corrente elevata della figura 3.10 (vedi pagina 61) e vediamo che il comportamento I-V si avvicina a quello di una resistenza ohmica. Il valore della resistenza di limitazione dipende dalla conducibilità elettrica della massa dei granuli semiconduttori di ZnO, che hanno concentrazioni di cariche tra 10^{17} e 10^{18} per cm^3. In questo modo si può stimare la conducibilità dell'ossido di zinco ad un valore inferiore a 0,3 ohm.

3.3 LA COSTRUZIONE DEI VARISTORI

Il processo di fabbricazione di un varistor GE-MOV® II è rappresentato nel diagramma di flusso di Figura 3.7. Il materiale di partenza può differire per la composizione degli ossidi addittivi in modo da coprire l'intera gamma di tensione dei prodotti.

I dati elettrici del componente vengono determinati nella fase di pressatura. La

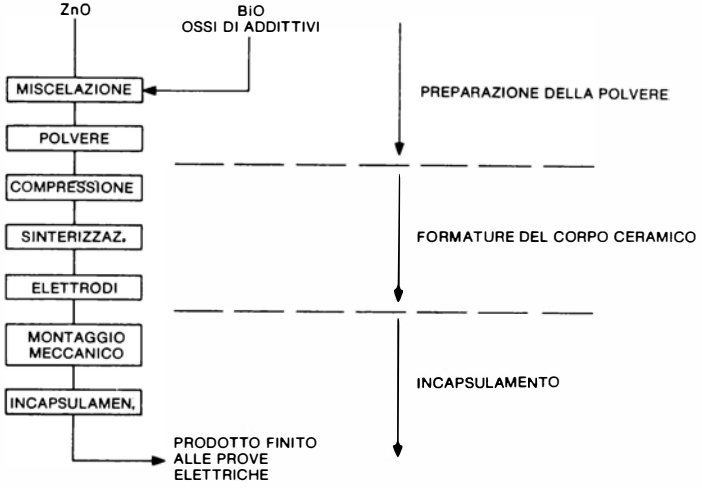


Figura 3.7 - Diagramma di flusso schematico della fabbricazione di un varistor GE-MOV® II.

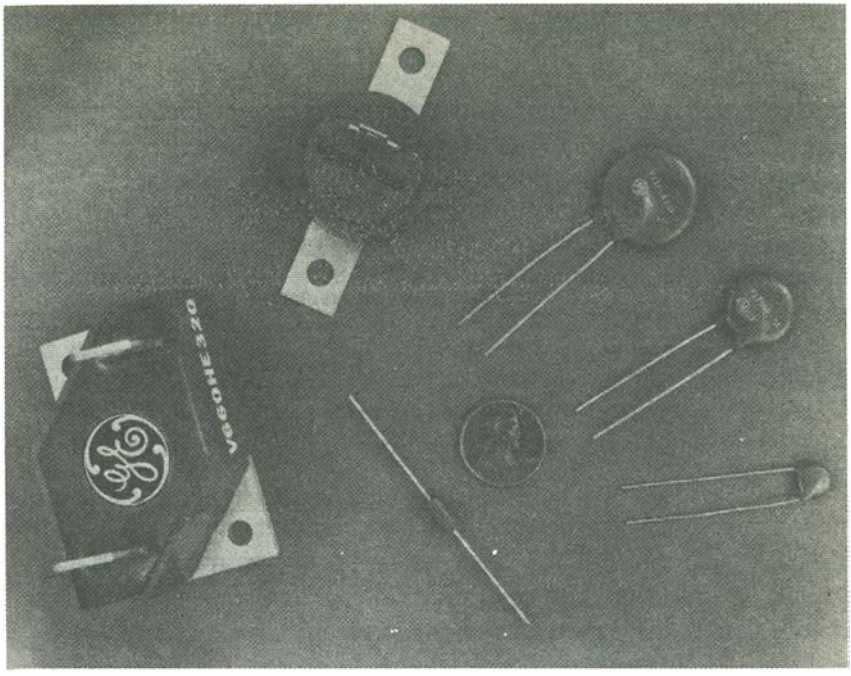


Figura 3.8 - Gli incapsulaggi attualmente disponibili per i varistori GE-MOV® II.

polvere viene compressa in forma di dischi circolari aventi spessore e diametro predeterminati. Per ottenere un dato valore della tensione nominale si varia lo spessore del disco. Per ottenere la prestazione desiderata nei riguardi della corrente di picco e della dissipazione di energia si varia il diametro della pastiglia. La gamma dei diametri ottenibili in commercio si vede dallo specchietto che segue:

Diametro nominale del disco - mm	3	7	14	20	32

Si possono naturalmente ottenere anche altre forme, per esempio rettangolari, semplicemente cambiando le matrici di pressatura. Dopo la compressione i dischi vengono sistemati in un forno e sinterizzati ad una temperatura superiore ai 1200°C. L'ossido di bismuto fonde a più di 825° C e qui si assiste all'*addensimento* iniziale della ceramica policristallina. Alle temperature superiori avviene un ingrossamento dei granuli e così si può ottenere una struttura con dimensione granulare controllata.

L'applicazione degli elettrodi si ottiene metallizzando a fuoco la superficie della ceramica con un film spesso di Argento. Si saldano quindi i terminali a filo od a

lamella. Per collegare i contatti ai dischi assiali sagomati da 3 mm si usa una resina epossidica conduttrice.

L'incapsulazione avviene in tre modi: per i contenitori a fili radiali si usa un rivestimento in bagno di resina epossidica fluida; per i contenitori muniti di contatti

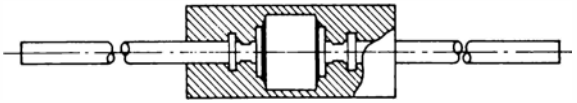


Figura 3.9A - Sezione trasversale di un incapsulaggio assiale sagomato.

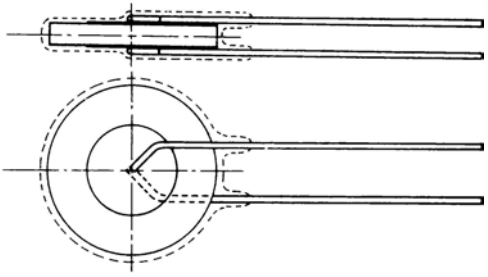


Figura 3.9B - Sezione trasversale di un contenitore a reofori readiali.

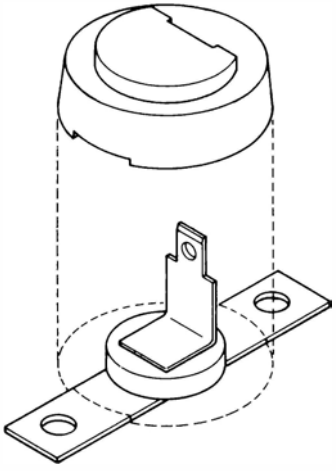


Figura 3.9C - Schizzo di un contenitore MOV di potenza.

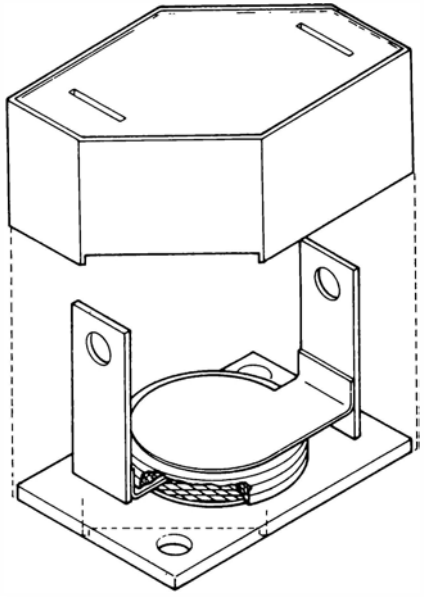


Figura 3.9D - Schizzo di un incapsulaggio per alta energia.

assiali e per quelli di potenza si usa un corpo sagomato in plastica mentre per quelli della serie ad alta energia si usa della resina epossidica versata in un guscio plastico di forma adatta. Diversi contenitori (package) permettendo delle variazioni nelle prestazioni energetiche e nel montaggio meccanico. La Figura 3.8 mostra dei campioni dei quattro contenitori base: il tipo assiale (serie MA), il tipo a fili radiali (serie L, Z), la configurazione di potenza (serie P) ed il tipo ad alta energia (serie HE).

La figura 3.9 mostra i dettagli costruttivi dei quattro contenitori principali. Nella Tabella che segue sono dati i diametri dei dischetti contenuti nei quattro contenitori.

TIPO DI CONTENITORE	DIAMETRO DEL DISCHETTO - mm
Assiale sagomato (serie MA)	3
Fili radiali (serie L e Z)	7, 10, 14 e 20
Di potenza (serie P)	20
Alta energia (serie HE)	32

3.4 LA CARATTERIZZAZIONE ELETTRICA

3.4.1 Caratteristiche V-I del varistor

Le caratteristiche elettriche del varistor si possono rappresentare in modo conveniente usando un reticolo doppio logaritmico per mostrare la grande estensione

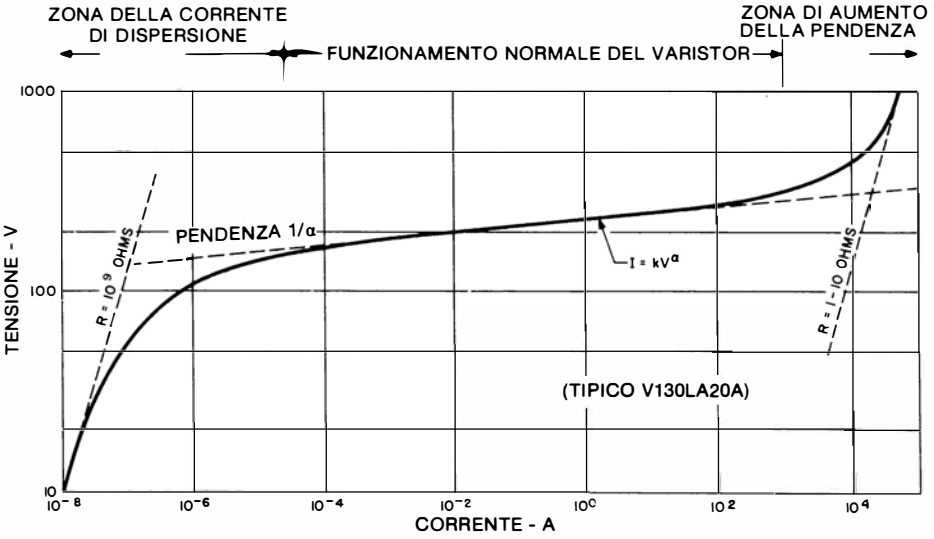


Figura 3.10 - Tipica curva V-I di un varistor, disegnata su un reticolo doppio-logaritmico.

della curva V-I. Il reticolo logaritmico risulta inoltre più chiaro di quello lineare che tende ad esagerare le non linearità in rapporto alla scala di corrente scelta. Una tipica curva caratteristica V-I è mostrata in Figura 3.10. Questo diagramma è esteso ad un campo di correnti maggiore di quello che si vede di solito sui data sheet (fogli dei dati) dei varistori, e ciò allo scopo di illustrare le tre diverse regioni di funzionamento elettrico.

3.4.2 Modello circuitale equivalente

Il modello elettrico del varistor può essere rappresentato dal circuito di Figura 3.11.

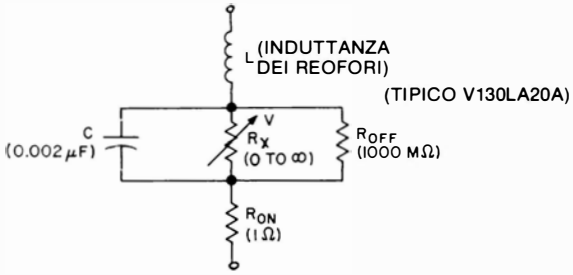


Figura 3-11 - Modello di circuito equivalente di varistor.

3.4.3 Regione delle correnti di perdita

Ai bassi livelli di corrente la curva V-I si può approssimare ad una relazione lineare (ohmica) che dimostra una notevole dipendenza dalla temperatura. Il varistor funziona nella regione ad alta resistenza (dell'ordine di 10^9 ohm) e si comporta in pratica come un circuito aperto. La resistenza non lineare R_x può essere trascurata in quanto sarà predominante la R_{OFF} in parallelo. Anche R_{ON} sarà trascurabile rispetto ad R_{OFF}.

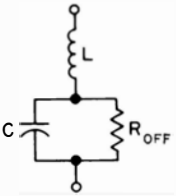


Figura 3.12 - Circuito equivalente alle basse correnti.

Per un determinato varistor la capacità resta quasi costante entro un vasto campo di tensioni e di frequenza quando ci si trova nella regione delle correnti di dispersione. Si ha solo una leggera diminuzione della capacità quando si applica la

tensione al varistor. Quando la tensione si avvicina a quella nominale, la capacità diminuisce di colpo. Quest'ultima resta pressoché costante fino ad una variazione di frequenza di 100 kHz. Analogamente piccola è la variazione con la temperatura: il valore di capacità a 25° C subisce una variazione inferiore al ± 10% per una variazione di temperatura da −40° C a +125° C.

L'effetto della temperatura sulla curva caratteristica V-I nella regione delle correnti di perdita si vede in Figura 3.13. Si può notare un'evidente dipendenza dalla temperatura.

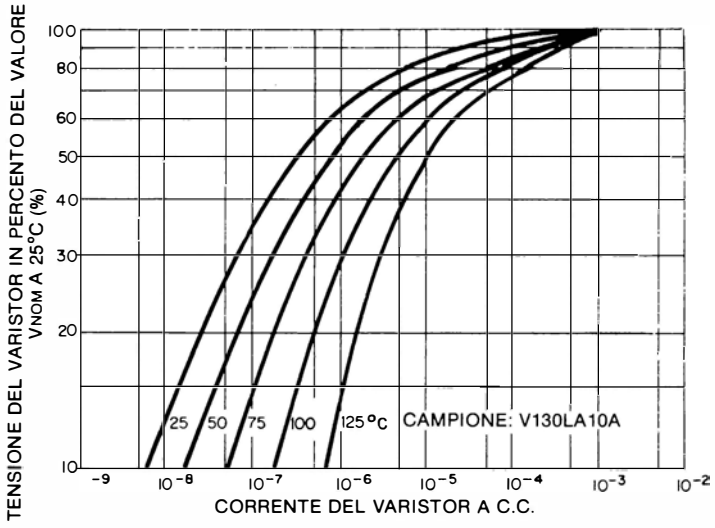


Figura 3.13 - Dipendenza dalla temperatura della curva caratteristica nella regione della dispersione.

La relazione tra la corrente di perdita I e la temperatura T è:

$$I = I_o \, \varepsilon^{-V_B/kT}$$

dove I_o = costante
k = Costante di Boltzmann
V_B = 0,9 eV

La variazione di temperatura corrisponde in effetti ad una variazione di R_{OFF}. Quest'ultima resta però a livelli molto alti anche se la temperatura sale a valori elevati. Per esempio, ad una temperatura di 125° C resta nell'ordine dei 10÷100 MΩ.

Per quanto R_{OFF} abbia un valore molto elevato, essa varia tuttavia con la frequenza. La relazione è all'incirca lineare con il reciproco della frequenza:

$$R_{OFF} \sim \frac{1}{f}$$

Nondimeno la coppia in parallelo di R_{OFF} e C ha natura prevalentemente capacitativa ad ogni frequenza che abbia interesse. Questo perché la reattanza varia anch'essa in modo pressoché lineare con 1/f.

Con valori della corrente maggiori, dell'ordine del milliampere o più, le variazioni per effetto della temperatura divengono minime. La curva del coefficiente di temperatura, (dv/dt), si vede in Figura 3.14. Bisogna osservare che il coefficiente di temperatura è negativo e diminuisce con l'aumentare della corrente. Nelle normali condizioni di funzionamento del varistor (i > 1 mA) la dipendenza dalla temperatura è inferiore al –0,05%/°C.

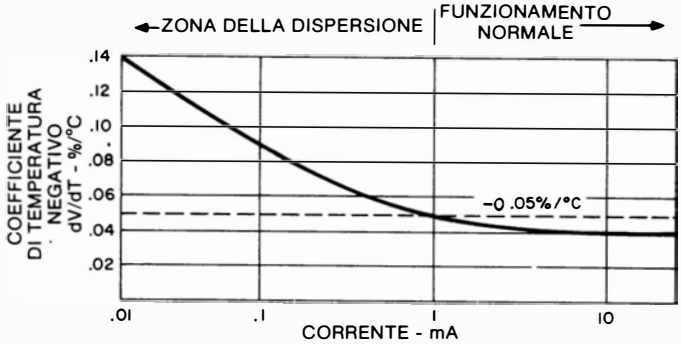


Figura 3.14 - Relazione tra il coefficiente di temperatura dV/dT e la corrente del varistor.

3.4.4 Campo di funzionamento normale del varistor

La caratteristica del varistor è rappresentata dall'equazione $I = kV\alpha$ dove k è una costante ed α è l'esponente che definisce il grado di non linearità. Alfa è una cifra di merito e può essere ricavata dalla pendenza della curva V-I oppure calcolata mediante la formula:

$$\alpha = \frac{\log (I_2/I_1)}{\log (V_2/V_1)}$$

$$= \frac{1}{\log (V_2/V_1)} \qquad \text{per } I_2/I_1 = 10$$

In questa regione il varistor è in conduzione ed R_x avrà la prevalenza su C, R_{ON} e R_{OFF}. R_x diverrà inferiore ad R_{OFF} di molti ordini di grandezza, ma tuttavia resterà maggiore di R_{ON}.

Figura 3.15 - Circuito equivalente con il varistor in conduzione.

Durante la conduzione la tensione al varistor resta pressoché costante per variazioni della corrente di vari ordini di grandezza. In pratica la resistenza R_x del componente cambia con il variare della corrente. Si può osservare questo fenomeno esaminando la resistenza statica o dinamica come funzione della corrente. La resistenza statica è definita da:

$$R_x = \frac{V}{I}$$

e la resistenza dinamica da:

$$Z_x = \frac{dv}{di} = V/\alpha I = R_x/\alpha$$

In figura 3.16 sono rappresentate le curve tipiche dei valori della resistenza in funzione della corrente I.

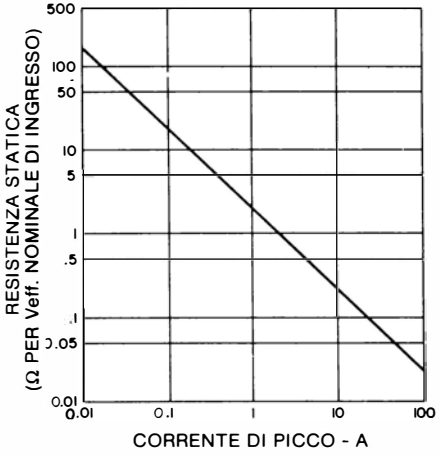


Figura 3.16A - Resistenza statica Rx del varistor.

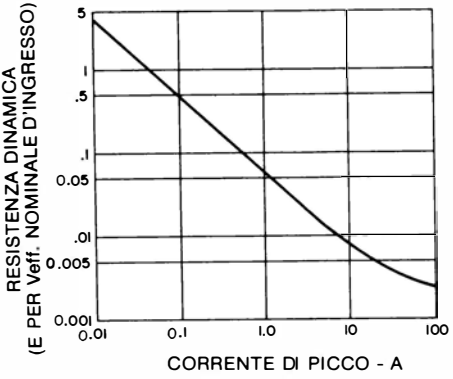


Figura 3.16B - Resistenza dinamica Zx del varistor.

Per quanto R_{OFF} abbia un valore molto elevato, essa varia tuttavia con la frequenza. La relazione è all'incirca lineare con il reciproco della frequenza:

$$R_{OFF} \sim \frac{1}{f}$$

Nondimeno la coppia in parallelo di R_{OFF} e C ha natura prevalentemente capacitativa ad ogni frequenza che abbia interesse. Questo perché la reattanza varia anch'essa in modo pressoché lineare con 1/f.

Con valori della corrente maggiori, dell'ordine del milliampere o più, le variazioni per effetto della temperatura divengono minime. La curva del coefficiente di temperatura, (dv/dt), si vede in Figura 3.14. Bisogna osservare che il coefficiente di temperatura è negativo e diminuisce con l'aumentare della corrente. Nelle normali condizioni di funzionamento del varistor (i > 1 mA) la dipendenza dalla temperatura è inferiore al −0,05%/°C.

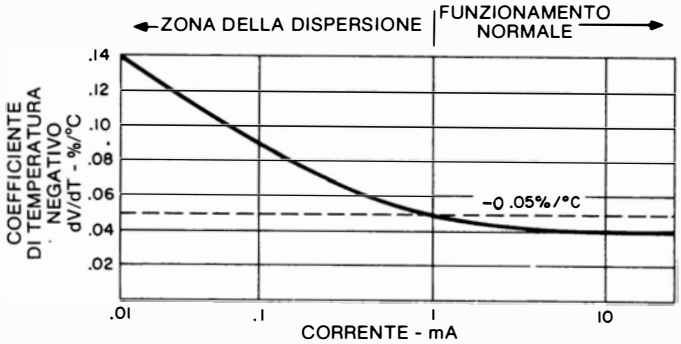


Figura 3.14 - Relazione tra il coefficiente di temperatura dV/dT e la corrente del varistor.

3.4.4 Campo di funzionamento normale del varistor

La caratteristica del varistor è rappresentata dall'equazione $I = kV\alpha$ dove k è una costante ed α è l'esponente che definisce il grado di non linearità. Alfa è una cifra di merito e può essere ricavata dalla pendenza della curva V-I oppure calcolata mediante la formula:

$$\alpha = \frac{\log (I_2/I_1)}{\log (V_2/V_1)}$$

$$= \frac{1}{\log (V_2/V_1)} \qquad \text{per } I_2/I_1 = 10$$

In questa regione il varistor è in conduzione ed R_x avrà la prevalenza su C, R_{ON} e R_{OFF}. R_x diverrà inferiore ad R_{OFF} di molti ordini di grandezza, ma tuttavia resterà maggiore di R_{ON}.

Figura 3.15 - Circuito equivalente con il varistor in conduzione.

Durante la conduzione la tensione al varistor resta pressoché costante per variazioni della corrente di vari ordini di grandezza. In pratica la resistenza R_x del componente cambia con il variare della corrente. Si può osservare questo fenomeno esaminando la resistenza statica o dinamica come funzione della corrente. La resistenza statica è definita da:

$$R_x = \frac{V}{I}$$

e la resistenza dinamica da:

$$Z_x = \frac{dv}{di} = V/\alpha I = R_x/\alpha$$

In figura 3.16 sono rappresentate le curve tipiche dei valori della resistenza in funzione della corrente I.

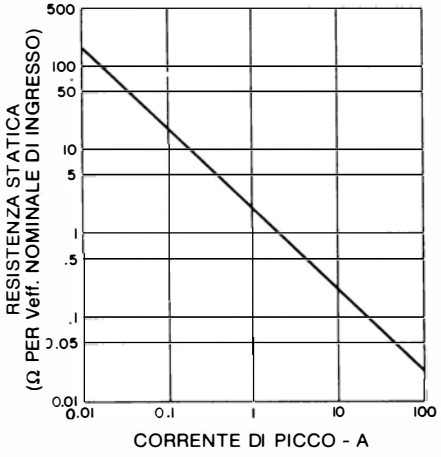


Figura 3.16A - Resistenza statica Rx del varistor.

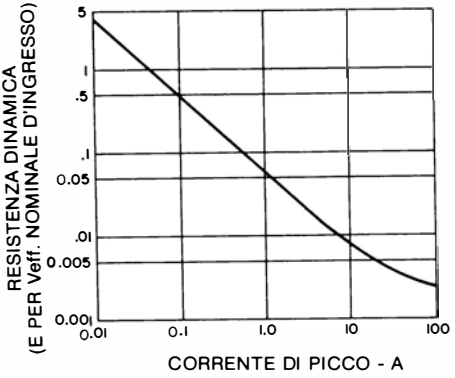


Figura 3.16B - Resistenza dinamica Zx del varistor.

3.4.5 Campo di funzionamento della salita della corrente

Alle correnti elevate, in vicinanza delle prestazioni massime, il varistor approssima il funzionamento in cortocircuito. La curva si allontana dalla relazione non lineare ed approssima il valore della resistenza di massa del materiale, all'incirca da 1 a 10 Ω. Questa regione di culmine o di saturazione esiste in quanto il valore di R_v diventa approssimativamente uguale a quello di R_{ON}. La resistenza R_{ON} rappresenta la resistenza dei granuli di ossido di zinco qualora non esistessero le separazioni intercristalline. Questa resistenza è lineare (e quindi appare con una pendenza maggiore nel diagramma logaritmico) e si manifesta a correnti che vanno da 50 a 50.000 A, a seconda delle dimensioni del varistor.

Figura 3.17 - Circuito equivalente al passaggio in conduzione del varistor.

3.4.6 Velocità di risposta ed accensioni incontrollate

Il funzionamento del varistor dipende da un meccanismo di conduzione simile a quello degli altri componenti a semiconduttore. Per questo motivo la conduzione interviene molto rapidamente, senza un ritardo apparente, comunque nell'ordine del nanosecondo. La Figura 3.18 mostra una fotografia a doppia esposizione delle tracce di due tensioni, riprese senza o con il varistor inserito in un generatore di impulsi a bassissima induttanza. La seconda traccia (che non è sincronizzata con la

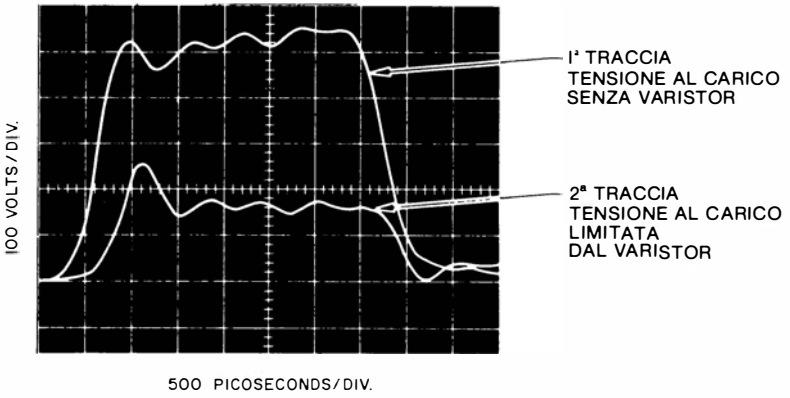
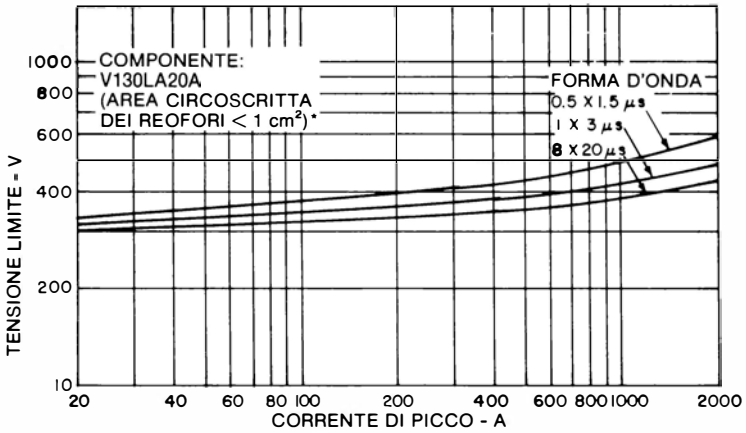


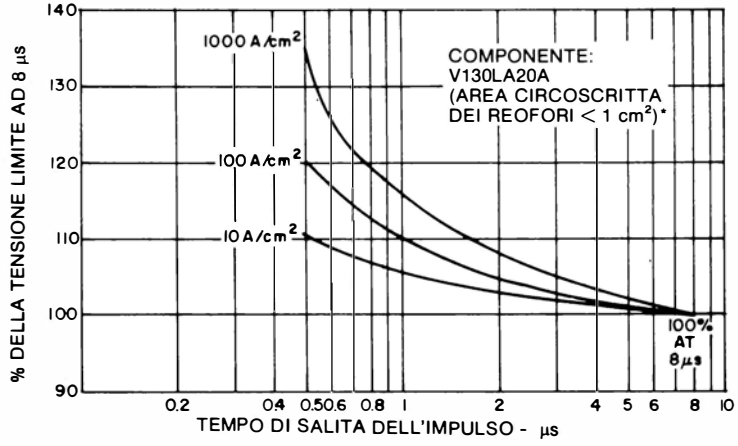
Figura 3.18 - Risposta di un varistor a ZnO ad impulso a fianco di salita ripido (500 picosecondi).

prima, ma solo sovrapposta ad essa sullo schermo oscillografico), dimostra che l'effetto livellante del varistor ha luogo in meno di un nanosecondo.

Nei componenti di tipo convenzionale muniti di reofori a filo, l'induttanza di questi fili maschera totalmente la rapida azione del varistor, quindi il circuito di prova di Figura 3.18 richiede l'inserzione di un frammento di materiale del varistor



a) Caratteristiche V-I per diversi tempi di salita della Corrente



*VEDI § 7.3.2

b) Sovraelongazione definito in riferimento all'impulso di corrente normalizzato da 8 x 20 μs

Figura 3.19 - Risposta dei varistori con reofori a filo alle onde di corrente.

in una linea coassiale, allo scopo di dimostrare il tempo di risposta intrinseco del varistor.

Delle prove condotte su componenti muniti di uscite a fili, anche se condotte con la massima attenzione atta a minimizzare la lunghezza dei fili, dimostrano che le tensioni indotte nella spira formata da questi fili danno un sostanziale contributo alla tensione che appare sui terminali di un varistor in cui passa una corrente elevata, in aumento veloce. Per fortuna le correnti che possono essere prodotte da un generatore di transitori hanno sempre un tempo di salita inferiore a quello dei transitori di tensione pratici. Le applicazioni più diffuse dei varistori GE-MOV® II comprendono tempi di salita alla corrente superiori ai 0,5 μs.

Il tasso di aumento della tensione non è il miglior termine da usare parlando della risposta di un varistor ad un impulso veloce, (a differenza di quanto avviene con gli scaricatori a spinterometro, che effettuano la commutazione tra isolamento e conduzione in un tempo finito). La caratteristica più giusta da prendere in considerazione è la risposta del varistor alla corrente di transitorio che un dato circuito può erogare.

La caratteristica V-I della Figura 3.19a mostra l'influenza della forma d'onda della corrente sulla risposta del varistor; a partire da questi dati si può definire un effetto di "overshoot" *(Sovraelongazione)* che può essere l'aumento relativo della tensione massima che appare ai capi del varistor durante un rapido aumento della corrente, se si usa come riferimento l'onda di corrente convenzionale da 8/20 μs. La Figura 3.19b mostra la variazione tipica della tensione di limitazione in funzione del tempo di salita, per diversi livelli di corrente.

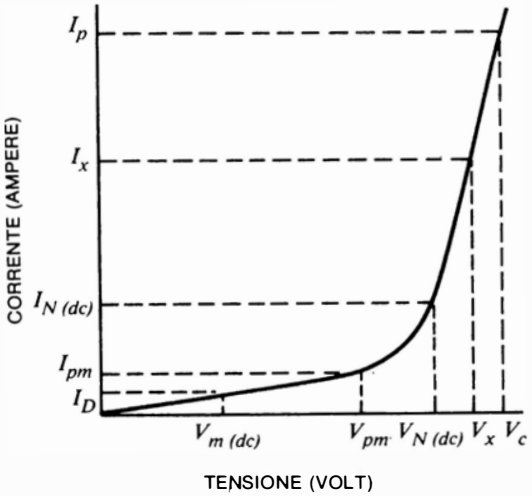
3.5 LA TERMINOLOGIA SPECIFICA DEI VARISTORI

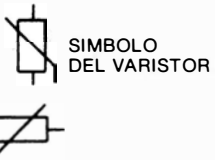
Il tabulato che segue definisce la terminologia usata nelle norme riguardanti i varistori. La normalizzazione esistente deve essere rispettata il più possibile.

3.5.1 Definizioni (Norme IEEE C62.33-1982)

Una caratteristica è una proprietà inerente e misurabile di un componente. Può trattarsi di proprietà elettriche, meccaniche oppure termiche, ed esse possono essere espresse dal valore che assumono ad una data condizione.

Una prestazione nominale è un valore che stabilisce una possibilità limite oppure una condizione limite (massima oppure minima) nel funzionamento di un dispositivo. Essa viene determinata in rapporto a specifiche condizioni ambientali e per determinati modi di funzionamento. La prestazione indica il livello di sovraccarico che può essere applicato al dispositivo senza causarne un peggioramento delle caratteristiche o la distruzione. I simboli riguardanti il varistor appaiono nel grafico lineare V-I riportato in Figura 3.20.





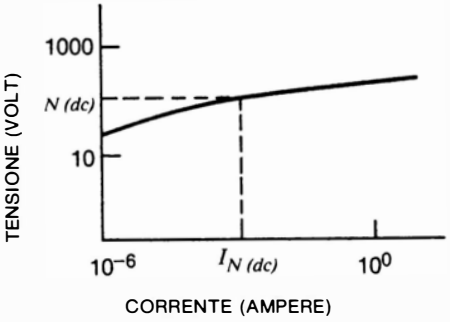


Figura 3.20 - Grafico I-V che illustra i simboli e le definizioni.

3.5.2 Caratteristiche dei varistori (norme IEEE C62.33-1982, Sottosezioni 2.3 e 2.4

Terminologia e spiegazioni	Simboli
2.3.1 Tensione di limitazione. Tensione di picco ai capi del varistor, misurata con una determinata corrente impulsiva di picco ed una data forma d'onda. Nota: la tensione e le correnti di picco non sono necessariamente in fase.	V_c
2.3.2 Correnti nominali di transitorio per singolo impulso (varistor). Massima corrente di picco che può essere applicata per un singolo impulso da 8/20 μs, mentre è applicata anche la tensione nominale di linea, senza provocare guasti nel componente.	I_{tm}
2.3.3 Correnti impulsive in relazione alla durata utile (Varistor). Valori di I_{tm} diminuiti per durate d'impulso che superino quelle della forma d'onda da 8/20 μs, e per impulsi multipli che possano essere applicati nel corso della vita utile del componente.	—
2.3.4 Tensione efficace nominale (Varistor). Massimo valore efficace della tensione sinusoidale che può essere applicata in continuità.	$V_{m(ca)}$
2.3.5 Tensione nominale c.c. (Varistor). Tensione continua massima che può essere applicata in continuità.	$V_{m(cc)}$
2.3.6 Corrente di riposo in c.c. (Varistor). Corrente nel varistor, misurata alla tensione nominale $V_{m(cc)}$.	I_D
2.4 Per certe applicazioni, potranno venire utili alcuni dei termini che seguono	
2.4.1 Tensione nominale del varistor. Tensione ai capi del varistor, misurata alla prescritta corrente continua impulsiva $I_{N(cc)}$ con una data durata. La corrente $I_{N(cc)}$ è prescritta dal fabbricante del varistor.	$V_{N(cc)}$
2.4.2 Tensione nominale di picco del varistor. Tensione ai capi del varistor, misurata ad una data corrente alternata di picco $I_{N(ca)}$ che abbia una data durata. La corrente $I_{N(ca)}$ è prescritta dal fabbricante del varistor.	$V_{N(ca)}$
2.4.3 Tensione di picco nominale ricorrente (Varistor). Massima tensione di picco ripetitiva che potrà essere applicata con un determinato rapporto tra impulso e pausa e con una determinata forma d'onda.	V_{pm}
2.4.4. Energia nominale di transitorio ad impulso singolo (Varistor). Energia che può essere dissipata per un singolo impulso della massima corrente ammessa, con una data forma d'onda, quando sia applicata la tensione alternata o continua nominale, senza che il componente risulti danneggiato.	W_{tm}
2.4.5 Dissipazione di potenza media nominale al transitorio (Varistor). Massima potenza media dissipabile, che provenga da un gruppo di impulsi che insorgano entro un dato intervallo isolato di tempo, e che non causi danni al componente.	$P_{t(AV)m}$
2.4.6 Tensione del varistor. Tensione ai capi del varistor, misurata ad una data corrente I_x.	V_x
2.4.7 Rapporto di limitazione della tensione (Varistor). Una cifra di merito che misura l'efficacia della limitazione di tensione da parte del varistor, definita dai simboli $V_c/V_{m(ca)}$/ $V_c/V_{m(cc)}$.	$\frac{V_c}{V_{pm}}$
2.4.8 Esponente non lineare. Una misura della non-linearità del varistor fra due date correnti di funzionamento I1 e I2, come descritto dalla formula $I = kV\alpha$ dove k è una costante del componente, $I1 \leqq I \leqq I2$ è: $$\alpha_{12} = \frac{\log I_2/I_1}{\log V_2/V_1}$$	α

Terminologia e spiegazioni	Simboli
2.4.9 Impedenza dinamica (Varistor). Una misura dell'impedenza ai piccoli segnali ad un dato punto di funzionamento, come definito dalla seguente formula: $$Z_x = \frac{dV_x}{dI_x}$$	Z_x
2.4.10 Resistenza (Varistor). Resistenza statica del varistor ad un dato punto di funzionamento, come definita dalla formula: $$R_x = \frac{dV_x}{dI_x}$$	R_x
2.4.11 Capacità (Varistor). Capacità tra i due terminali del varistor misurata ad una data frequenza e con una data polarizzazione.	C
2.4.12 Potenza a riposo (Varistor). Dissipazione di potenza del varistor in c.a. ad una data tensione efficace $V_{m(ca)}$.	P_d
2.4.13 Eccesso di tensione (Varistor). La tensione in eccesso che superi la tensione di limitazione del componente per una data corrente che passi quando venga applicata un'onda di corrente con fronte in ascesa virtuale più rapido di 8 μs. Questo valore può essere espresso come % della tensione di limitazione (V_c) per un'onda di corrente da 8/20 μs.	V_{os}
2.4.14 Tempo di intervento (Varistor). Il tempo che passa tra il momento in cui l'onda supera il livello della tensione di limitazione (V_c) ed il picco dell'eccesso di tensione. Per gli scopi di questa definizione, la tensione di limitazione è definita con una forma d'onda in corrente da 8/20 μs, avente la stessa ampiezza di picco della corrente della forma d'onda usata per determinare questo tempo d'intervento.	—
2.4.15 Durata dell'eccesso di tensione (Varistor). Il tempo che intercorre tra il punto nel quale l'onda supera il livello della tensione di limitazione (V_c) ed il punto nel quale la tensione eccedente è diminuita del 50% rispetto al suo valore di picco. Per gli scopi di questa definizione, la tensione di limitazione è stata definita con una forma d'onda in corrente da 8/20 μs con una corrente di picco della stessa ampiezza della forma d'onda usata per questa durata dell'impulso di tensione in eccesso.	—

3.5.3 Forme d'onda di prova

Agli alti livelli di energia e di corrente è necessario misurare le caratteristiche del varistor mediante forme d'onda impulsive. Qui di seguito facciamo vedere la forma d'onda normalizzata ANSI C62.1, (Fig. 3.21) un'onda con discesa esponenziale che rappresenta gli impulsi originati dai fulmini e la scarica dell'energia accumulata in un circuito reattivo.

La forma dell'onda di corrente da 8 / 20 μs (8 μs per la salita e 20 μs per la discesa al 50% del valore di picco) viene usata come impulso standard, ed è basata su esperienze industriali, serve per determinare le caratteristiche e le prestazioni nominali già descritte. Una eccezione è costituita dall'energia nominale (W_{tm}), per

la quale viene usata una forma d'onda di maggior durata di 10 / 1000 μs. Questa situazione rappresenta meglio i disturbi ad alta energia che solitamente derivano dalla scarica induttiva di motori e trasformatori. I varistori GE-MOV® II sono dimensionati per un sovraccarico massimo impulsivo di energia che origina una variazione della tensione a varistor (V_N) che non superi il ± 10% del valore iniziale.

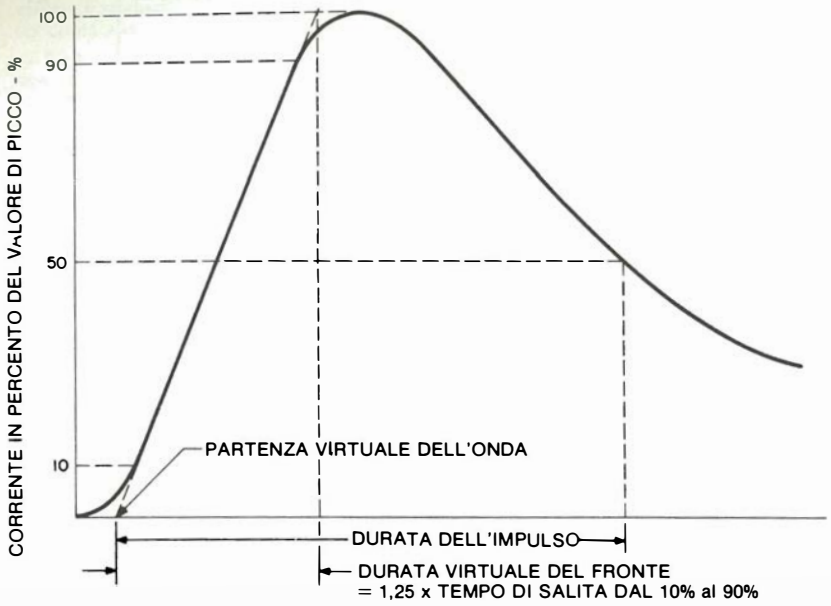


Figura 3.21 - Definizione della forma d'onda dell'impulso di corrente.

BIBLIOGRAFIA

1. J.D. Harnden, F.D. Martzloff, W.G. Morris and F.B. Golden, "The GE-MOV® Varistor — The Super Alpha Varistor," Electronics, 45 (No. 21) (1972) 91

2. W.G. Morris, "Electrical Properties of ZnO-Bi_2O_3 Ceramics," J. Am. Ceram. Soc., 56, (1973) 360.

3. M. Matsuoka, "Non-Ohmic Properties of Zinc Oxide Ceramics," Jap. Jnl. Appl. Phys. 10, (1971) 736.

4. G. Mahan, L. Levinson, H. Philipp, "Single Grain Junction Studies at ZnO Varistors — Theory & Experiment," Report # 78CRF160, G.E. CR&D, Schenectady, N.Y. (1978). Also, Applied Physics Letters.

5. G. Mahan, L. Levinson, H. Philipp, "Theory of Conduction in ZnO Varistors," Journal of Applied Physics.

6. Levine J.D., "Theory of Varistor Electronic Properties," *Critical Review of Solid State Science, 5, 1975, pp. 597-608.*

7. *May, J.E., "Carrier Concentration and Depletion Layer Model of Zinc Oxide Varistors," Bulletin of the American Ceramic Society,* Vol. 57, No. 3, 1978, p. 335.

8. Sze, S.M., "Physics of Semiconductor Devices," John Wiley & Sons, New York, N.Y., 1969.

9. Einzinger, R., "Microcontact Measurement of ZnO Varistors," Ber. Dt. Keram, Vol. 52, 1975, pp. 244-245.

10. Lou, L.F., "Current-Voltage Characteristics of ZnO-Bi_2O_3 Heterojunction," *Journal of Applied Physics,* Vol. 50, 1979, p. 555.

11. Lou, L.F. "Semiconducting Properties of ZnO-Grain Boundary-ZnO Junctions in Ceramic Varistors", *Appl. Phys. Letters,* Vol. 36, 1980, pp. 570-572.

12. Lou, L.F. and J.E. May, Unpublished Research, General Electric, Syracuse, N.Y., 1981.

13. Morris, W., "Physical Properties of the Electrical Barriers in Varistors", *J. Vac. Sci. Technol.,* 13, 1976, pp. 926-931.

14. Bernasconi, J., S. Strassler, B. Knecht, H. Klein and A. Ment, *Solid State Communication,* Vol. 21, 1977, pp. 867-869.

15. Pike, G. and C. Seager, "The DC Voltage Dependence of Semiconductor Grain-Boundary Resistance", *Journal of Appl. Phys.,* Vol. 50, 1979, pp. 3414-3422.

CAPITOLO 4

COME PROGETTARE CON I VARISTORI GE-MOV® II

4.1 LA SCELTA DEI VARISTORI

Il varistor deve funzionare sia alle condizioni di normale esercizio che di transitorio. Le prestazioni di questi componenti permettono una scelta dell'appropriato dimensionamento atto a garantire una funzionalità affidabile. Il processo di scelta richiede una conoscenza delle caratteristiche elettriche dell'ambiente di applicazione. Quando l'ambiente non risulta completamente definito, si possono fare alcune approssimazioni.

Per la maggior parte delle applicazioni la scelta si fa con un processo a cinque fasi:

1) Determinare la tensione nominale di esercizio necessaria.
2) Stabilire l'energia di transitorio che dovrà essere assorbita dal varistor.
3) Calcolare la corrente di picco del transitorio attraverso il varistor.
4) Determinare i requisiti riguardanti la potenza dissipata.
5) Scegliere il modello che fornisca le caratteristiche di limitazione di tensione necessarie.

4.1.1 Tensione nominale per funzionamento a regime

Prendiamo in considerazione la massima tensione che potrà essere applicata al varistor in funzionamento normale, che tenga conto di tutte le condizioni della

SIGLA DEL MODELLO	PRESTAZIONI LIMITE (25°C)				CARATTERISTICHE						DIMENSIONI (mm)
	CONTINUO		TRANSITORIO		TENSIONE DEL VARISTOR ALLA CORRENTE DI PROVA DI 1 mA c.c			MASSIMA TENSIONE DI LIMITAZIONE (8/20 µs)		CAPACITA' NORMALE	
	RMS TENS. EFF.	DC TENS. c.c.	ENERGIA (10/1000 µs)	CORRENTE DI PICCO (8/20 µs)							
	$V_{m(ca)}$	$V_{m(cc)}$	W_{tm}	I_{tm}	MIN.	V_N	MAX.	V_C	I_P	f=0.1-1 MHz	
	VOLTS	VOLT	JOULES	AMPERES	VOLT	VOLT	VOLT	VOLT	AMPS	PICOFARADS	
V130LA1	130	175	7	800	184	200	255	390	10	180	7
V130LA2			11	1200			228	340	10	180	7
V130LA10A			38	4500			228	340	50	1000	14
V130LA20A			70	6500			228	340	100	1900	20
V130LA20B			70	6500			220	325	100	1900	20

Figura 4.1 - Tabella delle prestazioni e delle caratteristiche.

linea (ossia 110 % o più della tensione nominale). Le prestazioni si intendono per corrente alternata sinusoidale o per corrente continua costante. Qualora si applichi una forma d'onda non sinusoidale, la tensione ripetitiva di picco deve essere limitata a $\sqrt{2} \times V_{m(ca)}$.

I dati riguardanti i varistori della serie L si vedono in Figura 4.1 e si riferiscono a dispositivi con tensione nominale di 130 V, per mostrare come si usano le tabelle delle prestazioni dei dati.

Numero di modello - Indica una tensione nominale di 130 V efficaci in alternata.

$V_{m(ca)}$ - Questi modelli si possono far funzionare in continuità a tensioni fino a 130 V_{eff} in c.a., frequenza 50-60 Hz. Essi quindi sono adatti per linee a tensioni nominali di 117 V, permettendo di sopportare una condizione di tensione maggiorata al 110% sulla linea.

$V_{m(cc)}$ - È ammesso il funzionamento con tensione continua costante di 175 V applicata in continuità.

$V_{N(cc)}$ Min. - Indica la tensione minima ai terminali del varistor che potrà essere misurata con una corrente passante di 1 mA. Questa grandezza è una caratteristica dell'elemento e costituisce un importante parametro per il progetto o per le verifiche.

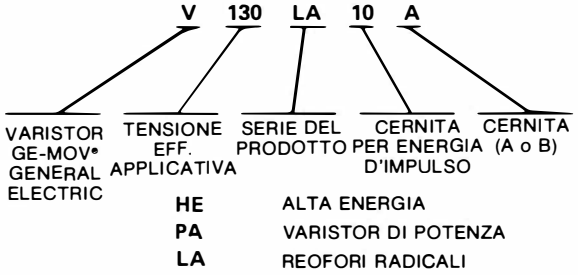
$V_{N(cc)}$ Max. ad 1 mA cc - Indica il limite massimo della tensione ai terminali del varistor misurata ad 1 mA c.c..

$V_{N(cc)}$ Max. ad 1 mA ca Picco - Indica il limite massimo della tensione ai terminali del varistor misurata ad una corrente alternata di 1 mA, 50-60 Hz. Notare che questa tensione è di circa il 7% maggiore rispetto alle misure in c.c.. Questa è una caratteristica intrinseca del varistor.

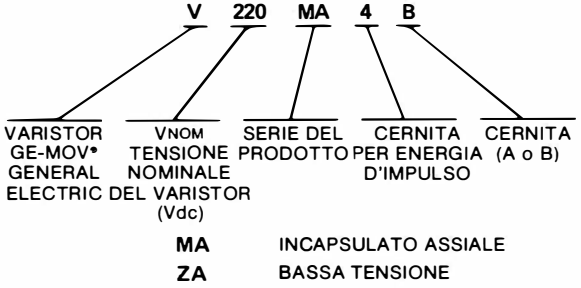
La formazione del numero di modello si vede nella figura che segue. Si osservi che il numero di serie del modello può avere due forme. Un gruppo si basa sulle prestazioni a tensione alternata per applicazioni prevalentemente destinate alle linee di potenza. Il secondo gruppo è basato sulla tensione caratteristica $V_{N(cc)}$ nel caso che interessino maggiormente le applicazioni in c.c.

4.1.2 Energia

Le prestazioni energetiche dei transitori sono fornite in joule (watt-secondo) nella colonna W_{tm} della tabella delle caratteristiche. Questo dato costituisce la massima energia ammissibile per un singolo impulso di corrente con forma d'onda di 10 / 1000 μs e con tensione applicata continua. Le energie nominali sono basate su una deviazione di V_N inferiore al ± 10% rispetto al valore inziale.



a) Modelli destinati principalmente ad applicazioni su linee di distribuzione in corrente alternata.



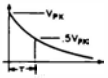
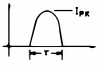
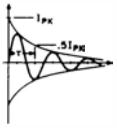
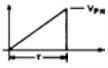
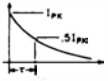
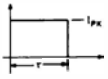
b) Modelli destinati principalmente ad applicazioni su circuiti e per corrente continua.

Figura 4.2 - Nomenclatura delle cifre di designazione del modello.

Quando il transitorio è generato dalla scarica di un'induttanza (ossia da un motore o da un trasformatore) o di un condensatore, se ne può calcolare facilmente il contenuto energetico. In molti casi il transitorio proviene da una sorgente esterna all'impianto ed ha un'ampiezza ignota. In questa situazione si può usare una tecnica di approssimazione per valutare l'energia del transitorio *assorbita* dal varistor. Il metodo richiede una misura della corrente e della tensione di transitorio sul varistor. Per determinare l'energia *assorbita* si applica la seguente equazione:

$$E = \int_0^{\tau} V_c(t)\, I(t)\, \Delta t = K V_c I \tau$$

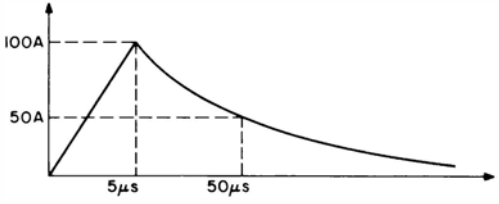
dove I è la corrente di picco applicata, V_c è la tensione di limitazione risultante, τ è la durata dell'impulso e K è una costante. In Figura 4.3 sono dati alcuni valori di K riguardanti le più comuni forme d'onda. Il valore di K e la durata d'impulso possono corrispondere sia ad una forma d'onda di corrente che ad una di tensione. Si può usare questa procedura di calcolo anche per forme d'onda più complesse, che andranno però divise in segmenti da trattare separatamente.

FORMA D'ONDA	EQUAZIONE	K*	FORMA D'ONDA	EQUAZIONE	K*
	$V_{PK} \sin(\frac{\pi}{\tau} t)$	0.15		$V_{PK}\ e^{-t/1.4\tau}$	0.056
	$I_{PK} \sin(\frac{\pi}{\tau} t)$	0.637		$I_{PK} \sin(\pi t) e^{-t/\tau}$	0.86
	$V_{PK}(\frac{t}{\tau})$	0.038		$I_{PK}\ e^{-t/1.44\tau}$	1.4
	$I_{PK}(\frac{t}{\tau})$	0.5		I_{PK}	1.0

* Basato su un valore di α da 25 a 40.

Figura 4.3 - Costanti del fattore di forma dell'energia.

Consideriamo il caso che la forma d'onda esponenziale mostrata qui di seguito, sia applicata ad un varistor GE-MOV® II tipo V130LA1.



La forma d'onda viene suddivisa in due parti che vengono trattate separatamente usando i fattori di Figura 4.3.; forma d'onda in corrente, sezione (1): da 0 a 5 μs; sezione (2): da 5 μs all'infinito. Si è già verificato che la tensione massima ai capi del V130LA1 alla corrente di 100 A è di 500 V (vedi le caratteristiche V-I sul foglio dati).

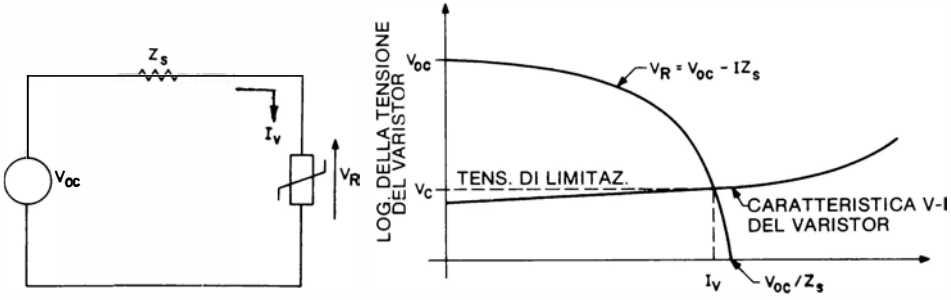
Sezione (1) $E = KV_c\, I\tau = (0{,}5)\ (500)\ (100)\ (5)(10^{-6}) = 0{,}13$ J
Sezione (2) $E = KV_c\, I\tau = (1{,}4)\ (500)\ (100)\ (50-5)\ (10^{-6}) = 3{,}15$ J

Totale 3,28 J

Le caratteristiche tecniche di Figura 4.1 indicano per questo componente una dissipazione di 4 J e quindi l'elemento è appena adeguato per l'applicazione. Volendo una maggior sicurezza sarà meglio impiegare un V130LA2 dimensionato ad 8 J.

4.1.3 Corrente di picco

Il dimensionamento alla corrente di picco può essere stabilito alla corrente di transitorio misurata nel circuito. Se il transitorio proviene da un'induttanza, la corrente di picco non potrà essere superiore a quella che percorre l'induttanza al momento dell'interruzione. Un altro metodo per trovare la corrente di transitorio è di usare un'analisi grafica. Se si conoscono la tensione di transitorio e l'impedenza del generatore si può stabilire un circuito equivalente secondo Thevenin. Si può quindi tracciare sulla caratteristica V-I a scala doppio logaritmica una linea di carico, come si vede in Figura 4.4. Le due curve si intersecano in corrispondenza del valore della corrente di picco.



1) Circuito equivalente

2) Analisi grafica per determinale il picco 1.

Figura 4.4 - Determinazione della corrente di picco del varistor causata da un transitorio dovuto ad un generatore di tensione.

La corrente di picco nominale I_{tm} è la massima ammissibile per un impulso singolo ad onda esponenziale di 8 / 20 μs (vedi Figura 3.21). Per gli impulsi di maggior durata, I_{tm} deve essere ridotta secondo le curve che si trovano sui fogli dati

del varistor. La Figura 4.5 mostra le curve di riduzione delle prestazioni per i componenti della serie L da 7 mm. Questa curva fornisce anche una guida per valutare l'abbassamento di corrente necessario in casi di impulsi ripetitivi. Il progettista deve prendere in considerazione il numero totale di impulsi transitori che si prevede avverranno durante la vita dell'impianto, e scegliere di conseguenza la giusta curva.

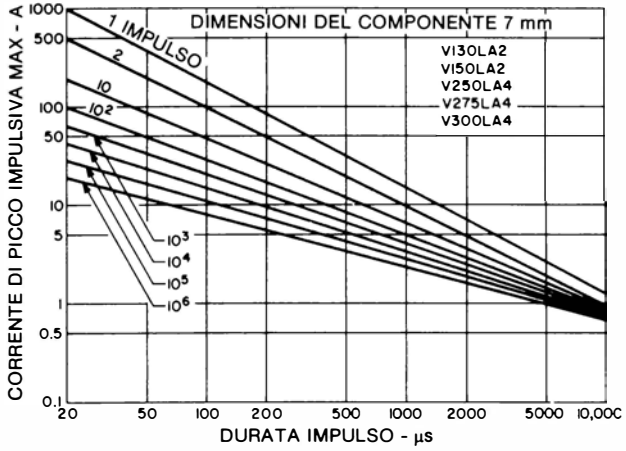


Figura 4.5 - Durata di vita utile in rapporto al numero totale degli impulsi.

Qualora la forma d'onda della corrente differisca dall'andamento esponenziale di Figura 3.21, si potranno usare le curve di Figura 4.5 per convertire la durata di impulso basandosi sull'energia equivalente. Il risultato si ottiene con facilità usando le costanti di Figura 4.3. Si supponga per esempio che la corrente effettiva misurata abbia una forma d'onda triangolare con una corrente di picco di 10 A, una tensione di picco di 340 V ed una durata d'impulso di 500 µs.

Quindi: $E = (0{,}5)\,(10) \times (340) \times (500) \times (10^{-6})$
$= 850$ mJ

La forma d'onda esponenziale di uguale energia si può trovare dalla:

$$E_{TRIANGOLARE} = E_{ESP}$$
$$850 \text{ mJ} = 1{,}4\, V_C\, I \tau_{ESP}$$

Si presuppone che la forma d'onda esponenziale abbia valori uguali di V_C e di I. Quindi:

$$\tau_{ESP} = \frac{850 \text{ mJ}}{1{,}4\ (340)\ (10)}$$
$$= 179\ \mu s$$

oppure: $$\tau_{ESP} = \frac{K^* \tau^*}{1{,}4}$$

Dove: K^* e τ^* sono i valori riferiti alla forma d'onda triangolare e τ_{ESP} è la durata d'impulso della forma d'o,da esponenziale equivalente.

La parte di salita dell'impulso può essere trascurata quando la durata totale dell'impulso è maggiore di cinque o più volte. Dalle curve di Figura 4.5 che forniscono il numero di impulsi totali che il componente potrà subire nella sua vita utile si può ricavare, per il precedente esempio, un valore di 10^4 impulsi.

4.1.4 Come dissipare la potenza

I transitori che entrano in un soppressore sviluppano calore in maniera talmente rapida da non poter essere dissipato durante gli intervalli tra gli impulsi. Quindi per un soppressore non occorre prevedere dei sistemi dissipatori termici, a meno che i transitori non avvengano in successione molto rapida. A queste condizioni la

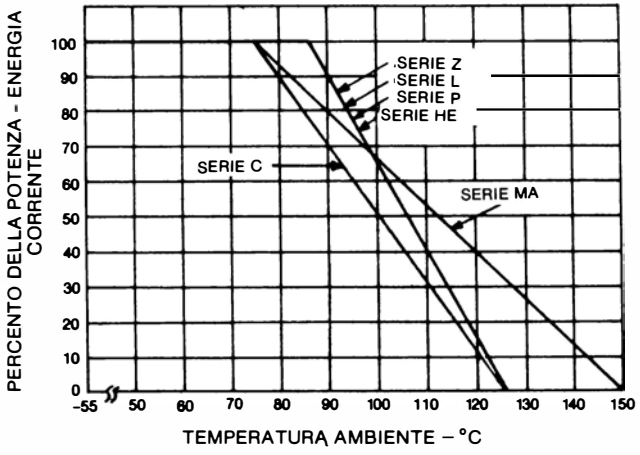


Figura 4.6 - Prestazioni limite di corrente, potenza ed energia, con il variare della temperatura.

dissipazione di potenza che occorre è data dal prodotto dell'energia (watt-secondi) per ciascun impulso moltiplicata per il numero di impulsi al secondo. La potenza così sviluppata deve restare entro i valori specificati nelle tabelle dei dati. Si deve osservare che i varistori possono dissipare soltanto una bassa potenza media e non sono quindi adatti per applicazioni ripetitive che comportino quantità *sostanziali* di potenza media dissipata. Inoltre i valori di funzionamento devono essere ridotti in presenza di alte temperature, secondo le curve di Figura 4.6.

4.1.5. Scelta della tensione di limitazione

Per tutti i modelli di varistori GE-MOV® II sono previste nei fogli dati le caratteristiche V-I al transitorio. Nella Figura 4.7 ci sono le curve riguardanti i

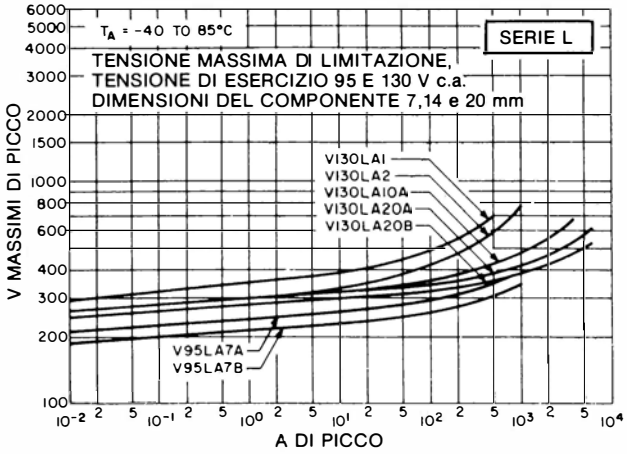


Figura 4.7 - Caratteristiche V-I al transitorio per i modelli tipici della serie L.

modelli dimensionati per 130 V c.a. della serie L. Queste curve indicano la tensione di picco misurata ai terminali con una corrente impulsiva applicata da 8 / 20 μs. Se per esempio la corrente di picco dell'impulso applicato ad un V130LA2 è di 10 A, questo modello limiterà la tensione di transitorio ad un valore non superiore ai 340 V.

Se la corrente del transitorio è ignota si può usare il metodo grafico illustrato in Figura 4.4. Conoscendo la tensione di transitorio e l'impedenza di generatore si può tracciare una linea di carico sulla caratteristica V-I. L'intersezione tra la linea di carico e la curva del particolare modello di varistor fornisce la corrente di transitorio nel medesimo e la tensione di picco del transitorio dopo la limitazione.

La possibilità del varistor di limitare la tensione di transitorio viene talvolta espressa in termini di rapporto di limitazione. Consideriamo per esempio un varistor impiegato nella protezione dei terminali di alimentazione di un'apparecchiatura elettrica. Se le condizioni massime imposte alla linea permetteranno un aumento fino a 130 V c.a. sarà possibile applicare dei picchi di 184 V. Il componente scelto dovrà avere una tensione nominale di 130 V c.a. o maggiore. Supponiamo che la scelta sia caduta su un varistor modello V130LA2. Questo tipo limiterà le tensioni transitorie a 340 V con correnti di 10 A. Si calcola il rapporto di limitazione in modo che sia:

$$\text{Rapporto di limitazione} = \frac{V_C \text{ a } 10 \text{ A}}{\text{Tensione di picco applicata}}$$

$$= \frac{340 \text{ V}}{184 \text{ V}} = 1{,}85$$

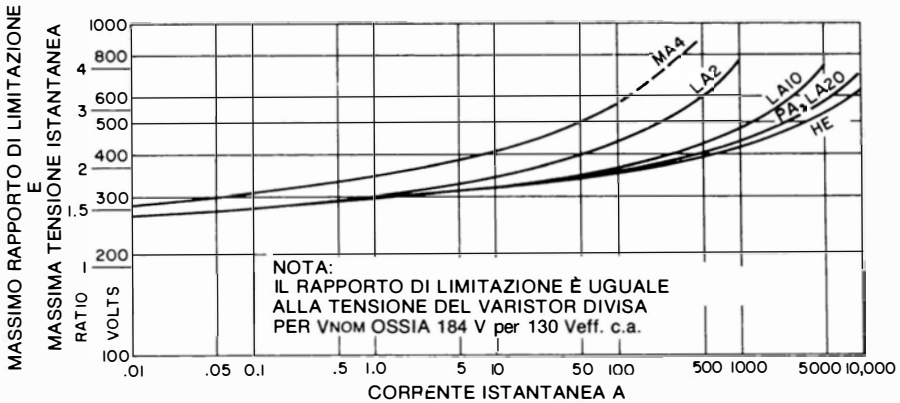


Figura 4.8 - Caratteristiche V-I del varistor, riferite a quattro famiglie di prodotti con tensione nominale di 130 V c.a..

Il rapporto di limitazione si può naturalmente trovare anche per altre correnti, riferendosi alla caratteristica V-I. In generale la possibilità di limitazione migliorerà con l'aumento delle dimensioni fisiche del varistor e del livello energetico. Tutto questo è illustrato in Figura 4.8 nella quale si fa un confronto delle capacità di limitazione delle diverse famiglie di varistori GE-MOV®. Si può vedere che le tensioni di limitazione di minor valore si ottengono con i componenti da 20 mm (serie L) e da 32 mm (serie HE). Inoltre molti modelli di varistor sono forniti in due o tre scelte in rapporto alla tensione di limitazione, designate da una lettera A, B o C posta alla fine della sigla del modello. La selezione A è il tipo standard, mentre le selezioni B e C forniscono una tensione di limitazione progressivamente inferiore.

Per esempio per il V130LA20A la tensione limite è di 340 V a 100 A mentre il V130LA20B limita a non più di 325 V.

4.1.6 Sommario

Sono state descritte in precedenza le cinque più importanti considerazioni da fare nella scelta di un varistor. La scelta definitiva di un modello consegue ad un bilancio tra quei fattori ed il costo commerciale del prodotto. In alcune applicazioni si potrà avere una priorità che riguarda requisiti come la tensione di limitazione o la capacità energetica e che indirizzerà la scelta verso un particolare tipo. In Figura 4.9 si vede un sommario delle proprietà dei varistori destinato ad un veloce confronto dei campi di funzionamento.

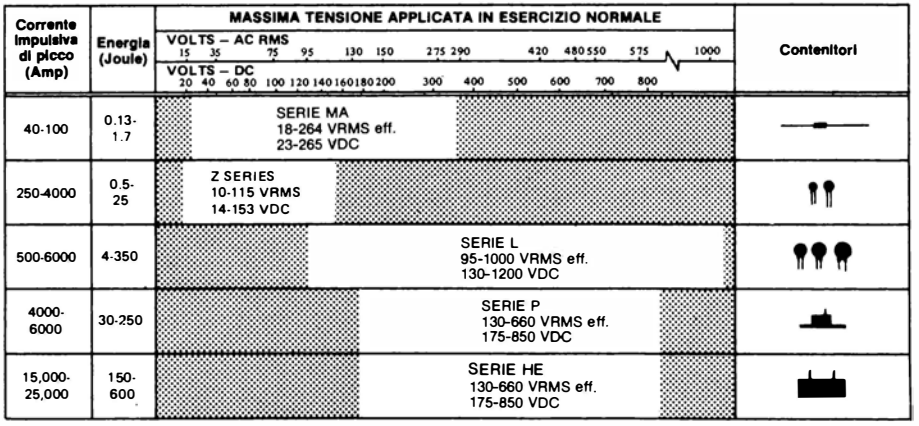


Figura 4.9 - Guida alla scelta delle famiglie di varistori.

4.2 COME I VARISTORI VANNO FUORI USO E LORO PROTEZIONE

I varistori sono robusti per natura e sono dimensionati in maniera prudente. Di conseguenza essi dimostrano una bassa incidenza di guasti. Ciò nonostante il progettista accorto può avere il desiderio di prevedere i possibili casi di guasto ed i loro effetti sui circuiti da proteggere.

4.2.1 Tipi di guasto

I varistori vanno subito in cortocircuito quando sono sottoposti a sovraccarichi che superino le loro correnti/energia di picco nominali. Vanno anche in cortocircuito quando sono fatti funzionare a tensioni di esercizio molto superiori alle rispettive tensioni nominali. Quest'ultimo tipo di guasto può anche eventualmente provocare l'interruzione del componente dovuta alla fusione della saldatura dei terminali.

Quando il componente va fuori uso disponendosi in corto circuito, la corrente che passa attraverso il varistor viene limitata principalmente dall'impedenza del generatore. Di conseguenza si potrà verificare il passaggio di un'energia molto elevata che provocherà la rottura meccanica del contenitore seguita da espulsione di materiali in forma solida o gassosa. Si possono prendere delle disposizioni atte a minimizzare questo rischio potenziale, usando le seguenti tecniche: 1) provvedere il varistor di un fusibile per limitare le elevate correnti di guasto, e 2) proteggere il circuito circostante con una schermatura fisica oppure disponendo il varistor lontano dagli altri componenti.

4.2.2 Protezione del varistor con fusibile

Bisogna effettuare un'opportuna scelta del fusibile in modo da limitare il valore della corrente ad un livello inferiore a quello di danneggiamento del varistor. La sistemazione del fusibile si può fare inserendolo nella linea di distribuzione che va al

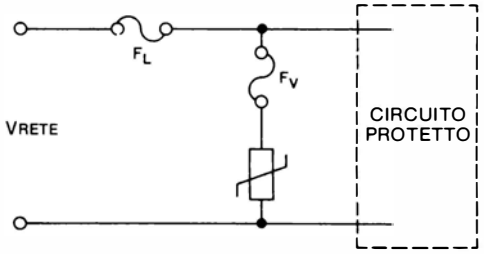


Figura 4.10 - Sistemazione del fusibile per la protezione del varistor.

circuito alimentato oppure in serie con il varistor, come si vede in Figura 4.10. Si preferisce in generale il fusibile alle protezioni di massima corrente mediante interruttore. L'azione dell'interruttore di massima corrente è troppo lenta per poter prevenire l'applicazione di un'eccessiva energia di guasto.

Nei circuiti industriali ad elevata potenza le correnti di linea sono in genere talmente alte da mettere fuori discussione l'uso di un fusibile di linea per la protezione del varistor. Infatti il fusibile potrebbe non bruciarsi per il guasto del varistor permettendone la distruzione. Nelle applicazioni a bassa potenza (5-20 A) è possibile usare solamente il fusibile di linea F_L.

L'uso di un fusibile di linea F_L invece di F_V non suscita il problema del potenziale sviluppo di un arco nel fusibile qualora questo sia applicato in parallelo al circuito. Viceversa, usando soltanto F_V la tensione d'arco del fusibile si aggiunge alla tensione del varistor aumentando V_C, la tensione di limitazione del transitorio.

Dato che molti fusibili hanno tensioni d'arco di picco di un valore superiore al doppio della tensione di picco d'esercizio, la fusione del fusibile può avere un effetto notevole sui livelli di protezione.

Un altro fattore che influenza la scelta della locazione è la conseguenza che potrà avere l'interruzione sul sistema. La sistemazione F_L del fusibile provocherà un'esclusione del circuito, mentre la posizione F_V non lo farà. Mentre il circuito può continuare a funzionare quando F_V salta, mancherà la protezione ai transitori. Per questo motivo è opportuno avere un'indicazione visiva delle condizioni di F_V.

4.2.3 Esempio di protezione con fusibili (applicazione per industria leggera)

Si deve proteggere un minicalcolatore per controllo di processo dai transitori che possono insorgere sulla linea di alimentazione a 115 V nominali. Il minicalcolatore assorbe dalla linea 7,5 A e la stabilità di tensione nominale di linea è garantita entro il ± 10%. Si sceglie un varistor tipo V130LA20A in base al fatto che la corrente di picco impulsiva nel caso più sfortunato potrà consistere in impulsi da 10/1000 μs con corrente di picco di 100 A. Questi requisiti di sovraccarico si basano sul fatto che l'impianto di distribuzione sia protetto all'ingresso con scaricatori di elettricità atmosferica aventi tensione massima di arresto di 5 kV. Ritenendo che l'impedenza caratteristica della linea sia quella classica di 50 Ω, la corrente di transitorio attraverso il varistor, nel caso più sfortunato, è di 100 A. La durata di impulso di 1 ms è stimata in base ad un'onda composta che possa sempre sopravvenire nel caso più sfortunato. Mentre la scarica di un fulmine dura di solito meno di 100 μs, essa si può ripetere in una raffica rapidissima che dura circa 1 s. Dalle curve di prestazione per il numero di impulsi massimo nella durata di vita nei modelli misura 20 della serie L si vede che la resistenza del V130LA20 al singolo impulso di durata di 1 ms è leggermente superiore ai 100 A.

Quanto sopra è sufficiente per applicazioni in zone dove l'attività elettrica atmosferica (fulmini) è media o leggera. Per le regioni con attività elettrica pesante, occorrerebbe la serie HE di varistori per poter essere in grado di far fronte a più di 70 transitori. Per fare la scelta tra la serie LA e la serie HE, il progettista deve considerare la probabilità dell'evento di una scarica elettrica atmosferica della specie peggiore ed il costo della sostituzione del fusibile in caso di cedimento del varistor.

Supponendo di essere in una zona a bassa incidenza di fulmini, il V130LA20A è una scelta ragionevole. Per accordare il fusibile con il varistor, si ridisegna la curva della durata al singolo impulso mettendo sulle ordinate il valore di I^2 t ed in ascisse la durata dell'impulso (vedi Figura 4.11). Il valore I^2 t per un impulso compositivo da 10 / 1000 μs si ricava dalla[1]:

$$I^2t = \frac{1}{3}\hat{I}^2(10\ \mu s) + 0{,}722\ \hat{I}^2(\tau_{(0.5)} - 10\ \mu s)$$

quando sia: $\tau_{(0.5)} \geqslant 200\ \mu s$ (tempo necessario perché la corrente d'impulso si abbassi ad un valore 0,5 di quello iniziale)

$$I^2 t \sim 0{,}722\ \hat{I}^2\ \tau_{(0.5)}$$

In questa formula il primo termine rappresenta l'impulso $I^2 t$ dovuto alla porzione in salita della forma d'onda di 10 μs, ed il secondo termine è l'I^2 t dovuto alla parte in discesa esponenziale.

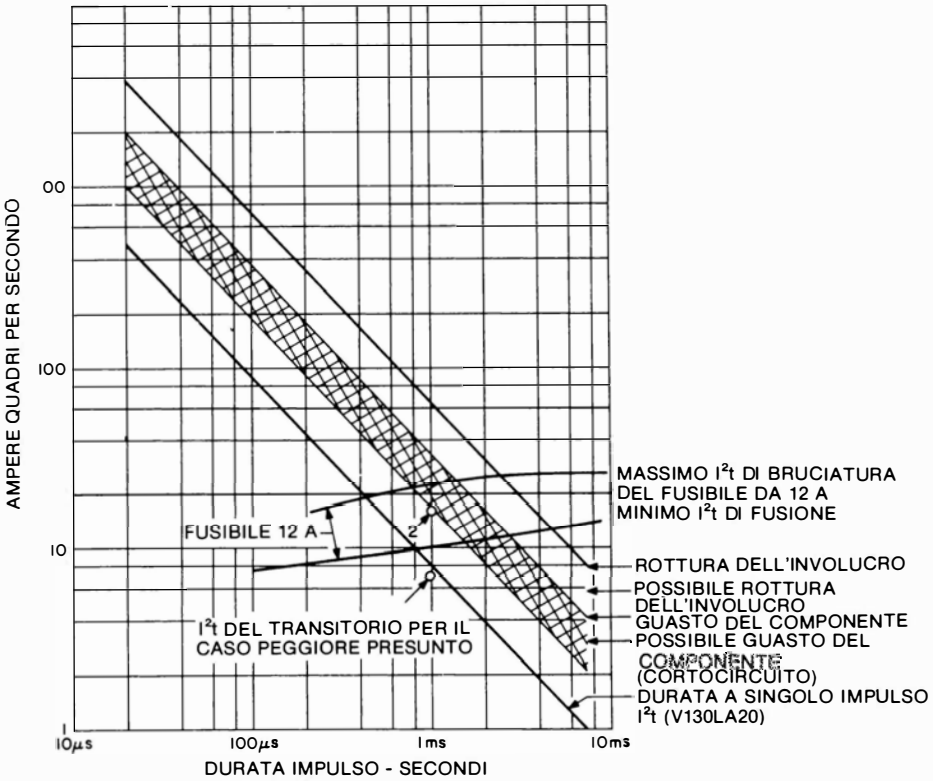


Figura 4.11 - Varistor GE-MOV® II. Diagramma di coordinazione dei fusibili.

La figura 4.11 mostra una zona quadrettata che rappresenta il luogo dei punti di possibile guasto del varistor. Questa superficie equivale ad un valore di I^2 t da doppio a quadruplo di quello ricavato dalle curve della corrente di picco in rapporto alla durata, che si trovano sui fogli dati. La curva che sta al di sopra della zona quadrettata e che è ad essa parallela, indica dove avviene la rottura dell'involucro.

Seguono ora delle indicazioni per la scelta del fusibile.

A) Il fusibile fonde, ossia apre il circuito solo se viene superato il valore di transitorio del caso più sfortunato e/o se il varistor si guasta.
B) Se il varistor si guasta, l'intervento del fusibile limita il valore di I^2 t applicato al varistor a grandezze inferiori a quelle necessarie per rompere il contenitore.
C) La tensione di esercizio del fusibile è 130 V eff.
D) Il fusibile fornisce una limitazione di corrente per dispositivi allo stato solido.

Basandosi su queste considerazioni si fa un primo tentativo scegliendo un fusibile Carbone-Ferraz 12 A_{eff}, 130 V_{eff}, classe FA. Il *minimo* I^2 t per la fusione ed il *massimo* I^2 t per la bruciatura per il fusibile da 12 A sono rappresentati dalle due curve sovraimpresse alle caratteristiche del varistor.

CORRENTE PREVEDIBILE AMPS RMS	TEMPO DI BRUCIATURA MILLISECONDI
60	8.0
120	5.6
240	3.5
1200	1.3
3600	0.57

Figura 4.12 - Fusibile da 12 A - Corrente prevedibile rispetto al tempo di bruciatura.

La fusione della valvola fusibile è garantita ad un I^2 t superiore del 40% al transitorio considerato probabile come caso più sfortunato. Al di sopra del punto di fusione, l'I^2 t di bruciatura ed il tempo di bruciatura dipenderanno dalla corrente di guasto disponibile dalla linea a 130 V_{eff}. La Figura 4.12 elenca i tempi di bruciatura nei confronti della corrente probabilmente disponibile nel circuito.

Dalla Figura 4.11 risulta che sarebbe opportuno avere un tempo di bruciatura inferiore ad 1,5 ms. Per correnti di guasto superiori ad 1,2 kA, il fusibile brucerà a meno di 24 A^2 s in un tempo di 1,3 ms. In questo modo si eviterà la rottura dell'involucro del varistor. La linea di distribuzione potrebbe però essere "morbida" ossia potrebbe avere un'impedenza di generatore piuttosto elevata alla frequenza di rete di 60 Hz, ed in questo modo la corrente di guasto verrebbe limitata a valori inferiori ad 1,2 kA. In questo caso c'é la possibilità che il fusibile non protegga l'involucro del varistor dalla rottura, ma comunque servirà ad isolare il varistor.

Esaminando ulteriormente questo esempio, è chiaro che il varistor sarà protetto contro la rottura dell'involucro anche se la corrente dell'impulso transitorio è maggiore di un 50% rispetto al valore ipotizzato, con il risultato di un I^2t di 16 A^2s (Punto 2 sulla Figura 4.11).

La posizione del fusibile in questo esempio di applicazione può essere sia sulla linea che in serie al varistor. Se lo si dispone in serie al varistor, si potrà scegliere un fusibile di linea a media o bassa velocità di intervento, per esempio un tipo "*ritardato*" da 15 A. In questo modo si sarà sicuri che un guasto al varistor sarà isolato dal suo fusibile senza che per questo bruci il fusibile di linea.

È opportuno disporre di un'indicazione visiva dello stato del fusibile del varistor, quando questo venga usato in aggiunta al fusibile di linea. Il circuito mostrato in

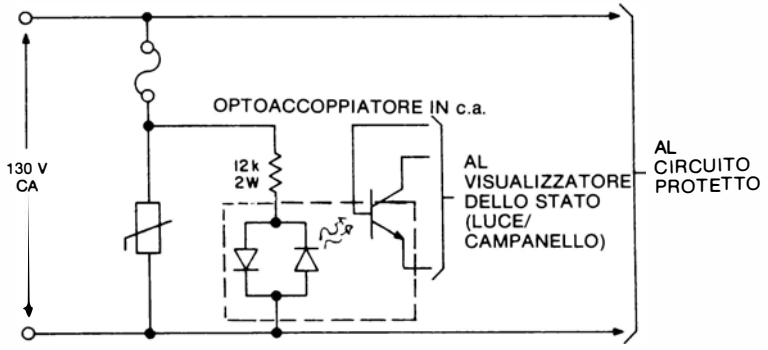


Figura 4.13 - Circuito di rilevamento dello stato del fusibile.

Figura 4.13 rileva la presenza di una tensione ai capi del varistor per mezzo di un fotoaccoppiatore. Quando il fusibile interrompe il circuito del varistor, il LED dell'accoppiatore non è più alimentato, ed il segnale di uscita dell'accoppiatore può essere usato per avvisare che ci si trova in una condizione di mancanza di protezione. Molti fabbricanti di fusibili prevedono degli indicatori delle condizioni del fusibile, che possono anche essere usati per attivare un allarme.

Nella scelta del fusibile, il lettore deve stare attento ad evitare i dati basati su valori medi od i dati rilevati a condizioni di funzionamento molto diverse dall'effettivo impiego della protezione. Per esempio non si dovrà tener conto dei dati in c.c. quando l'impiego è previsto per c.a.. Inoltre i dati rilevati per circuiti resistivi a fattore di potenza unitario non valgono per circuiti a basso fattore di potenza.

Di seguito diamo un elenco dei fabbricanti di fusibili rapidi per limitazione di corrente.

FABBRICANTI DI FUSIBILI PER LIMITAZIONE DI CORRENTE

Bussmann Manufacturing Division
McGraw-Edison Company
St. Louis, Missouri 63100

Carbone-Ferraz Inc.
P.O. Box 324
Elm Street
Rockaway, New Jersey 07866

Chase-Shawmut Company
347 Merrimac Street
Newburyport,
Massachussets 01950

English Electric Corporation
One Park Avenue
New York, New York 10016

General Electric Company
Power Systems Management Dept.
6901 Elmwood Avenue
Philadelphia, Pennsylvania 19142

General Fuse Corporation (GFC)
7954 Cameron Brown Court
Fullerton Industrial Park
Springfield, Virginia 22153

4 3 FUNZIONAMENTO IN SERIE ED IN PARALLELO DEI VARISTORI

Nella maggior parte dei casi il progettista può scegliere un varistor che soddisfi le prestazioni in tensione volute tra i modelli standard in catalogo. In alcune occasioni i modelli standard non soddisfano ai requisiti sia per il dimensionamento in tensione che per quello in energia/corrente. Quando si è in questa condizione, restano a disposizione due soluzioni: i varistori possono essere disposti in serie od in parallelo fino a raggiungere le prestazioni desiderate, oppure si può richiedere alla fabbrica di produrre un tipo "speciale" per far fronte alle condizioni di quell'unica applicazione.

4.3.1 Funzionamento dei varistori in serie

I varistori vengono montati in serie per due ragioni: per avere tensioni di esercizio superiori a quelle disponibili oppure per avere tensioni intermedie tra quelle dei modelli standard. Si possono ottenere, come vantaggio collaterale, delle maggiori prestazioni per quanto riguarda l'energia, rispetto alla soluzione ad elemento singolo. Riteniamo per esempio che una particolare applicazione esiga un varistor con terminali a filo che abbia una tensione nominale di 375 V c.a. efficaci e possa passare una corrente di picco I_{tm} di 6000 A. Il dato riguardante la I_{tm} determina le dimensioni del varistor. Osservando la serie L vediamo che in prossimità dei 375 V c.a. troviamo solo degli elementi a 320 V ed a 420 V. Il valore di 320 V è troppo basso e quello di 420 V (tipo V420LA40B) è troppo alto dal punto di vista della tensione di limitazione (V_C = 1060 V a 100 A). Disponendo in serie un V130LA20B ed un V250LA40B la tensione nominale massima è ora la somma delle due tensioni parziali, ossia 380 V. La tensione di limitazione V_C sarà ora la somma delle singole tensioni di limitazione, ossia 925 V a 1000 A. La corrente di picco sopportabile è ancora di 6000 A, ma l'energia dissipabile sarà ora la somma delle singole energie, ossia 140 J.

Per riassumere, i varistori possono essere collegati in serie, basta che essi abbiano correnti di picco identiche (I_{tm}) ovvero essi devono avere il disco dello stesso diametro. La caratteristica V-I complessiva, l'energia nominale e le tensioni massime di limitazione sono determinate dalla somma delle caratteristiche individuali e/o delle prestazioni dei singoli varistori.

4.3.2 Funzionamento in parallelo dei varistori

Per necessità operative possono risultare necessarie correnti di picco e dissipazioni di energia superiori a quelle dei singoli varistori della serie HE. In questo caso l'aternativa logica è di prendere in considerazione la possibilità di mettere i varistori in parallelo. Per fortuna tutti i varistori GE-MOV® II possiedono una proprietà agli alti livelli di corrente che ne rende possibile il collegamento in parallelo. Questa proprietà si basa sulla resistenza serie del varistor che assume la prevalenza nella regione di "svolta verso l'alto" della caratteristica V-I. Questa svolta verso l'alto è dovuta alla componente lineare della resistenza insita nel varistor (vedi Capitolo 3).

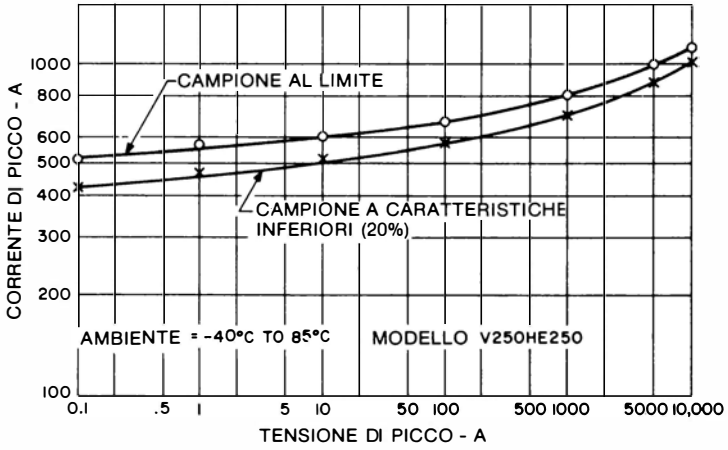


Figura 4.14 - Funzionamento in parallelo dei varistori ricavate graficamente.

Essa funge da impedenze di bilanciamento in serie o da zavorramento per indurre un certo grado di suddivisione della corrente che non è possibile ai bassi livelli di corrente. Il fenomeno è rappresentato in Figura 4.14. Ad una tensione di limitazione di 600 V, la differenza in corrente tra un campione con caratteristiche al livello massimo ed uno che per ipotesi abbia caratteristiche inferiori del 20%, sarà maggiore di 20 ad 1. Di conseguenza si ha una ripartizione della corrente pressoché nulla e l'intero carico in corrente dovrà essere sopportato da uno solo dei varistori. Questo fatto potrà naturalmente essere ancora accettabile ai bassi livelli di corrente, nel campo tra 10 e 100 A.

Agli elevati livelli di corrente, che superano i 1000 A, si raggiunge la regione di svolta verso l'alto e la ripartizione della corrente migliora sensibilmente. Per esempio, ad una tensione di limitazione di 900 V, le correnti nei rispettivi varistori (Figura 4.14) sono di 2500 A e di 6000 A. Per quanto lontano dalla ripartizione ideale, questo esempio mostra che esiste la possobilità di collegare in parallelo i varistori per ottenere correnti maggiori di quelle possibile con singoli elementi della serie HE.

Nella pratica i varistori devono essere appaiati mediante prove con impulsi a forte corrente, allo scopo di rendere possibile il collegamento in parallelo. Gli impulsi di prova devono essere dell'ordine di più di 1 kA, con durata di 8 / 20 μs od analoga. Si devono leggere e registrare le tensioni di picco. Si possono quindi estrapolare le caratteristiche a corrente elevata, nel campo tra 100 e 10.000 A. Il risultato si ottiene usando i punti riferiti ai dati di misura per tracciare delle curve parallele a quelle del foglio dati. Mediante questa tecnica verrà notevolmente migliorata la ripartizione della corrente rispetto all'esempio di Figura 4.14, che rispecchia praticamente le condizioni di massimo sbilanciamento.

	SERIE	PARALLELO
Obiettivo	• Maggior tensione sopportabile • Maggior energia sopportabile • Tensione non unificata	• Maggior corrente sopportabile • Maggior energia sopportabile
Richiesta una scelta da parte dell'utente	NO	SI
Tipi applicabili	• Tutti quelli che abbiano la stessa I_{tm}	• Serie L, P, Z, HE
Campo di applicazione	• Tutte le tensioni e le correnti	• Tutte le tensioni e solo le correnti maggiori, ossia > 100 A
Precauzioni	• Le I_{tm} devono essere uguali	• Si devono usare tipi con tensioni nominali identiche • Si devono provare e selezionare i componenti che abbiano caratteristiche V-I similari
Effetti sulle prestazioni limite	• Le tensioni di limitazione si sommano • Le tensioni di esercizio si sommano • La corrente è quella di un singolo componente • Le energie dissipabili W_{tm} si sommano	• Corrente passante in funzione della ripartizione della corrente, da determinare per via grafica • Energia dissipata come sopra, in funzione della ripartizione della corrente • Tensioni di limitazione determinate dalla caratteristica V-I composita dei componenti accoppiati • Tensione nominale pari a quella di un singolo elemento

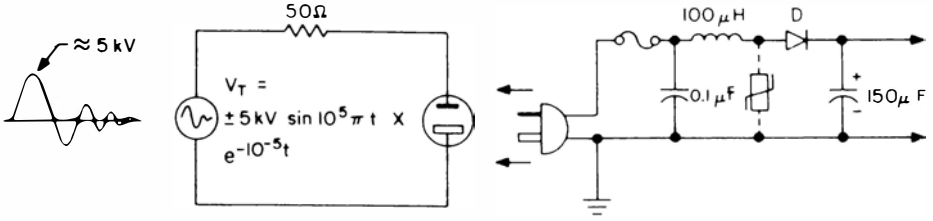
Figura 4.15 - Tabella di controllo per il funzionamento in serie ed in parallelo dei varistori.

Alcune linee direttrici per il funzionamento in serie ed in parallelo dei varistori sono date in Figura 4.15.

4.4 APPLICAZIONI

4.4.1 Protezione degli alimentatori dai danni provocati dai transitori sulla linea

PROBLEMA: Si vuole prevenire il danneggiamento dell'alimentatore di Figura 4.16(b) che deve essere collegato alla rete elettrica domestica a 117 V c.a.. Per la prova si deve usare un generatore di transitori che fornisca impulsi di tipo aderente alla realtà (Figura 4.16(a)).



(a) Generatore di transitori

(b) Circuito più comune di alimentatore

Figura 4.16 - Protezione degli alimentatori.

Se al circuito esistente viene applicato un transitorio, il raddrizzatore sarà sottoposto ad alte tensioni negative trasmesse attraverso il condensatore di filtro. Il circuito LC serve a prevenire la trasmissione dell'interferenza a radio frequenza nella linea di collegamento (come potrebbe avvenire in un televisore) ma serve anche a ridurre la tensione del transitorio. Un'attenta analisi mostra che il transitorio sarà ridotto all'incirca della metà, ottenendo un picco di 2,5 kV invece dei 5 kV presenti al raddrizzatore.

Si tratta però ancora di un valore troppo alto per un normale raddrizzatore, per cui bisogna prevedere una forma di soppressione. È opportuno usare l'impedenza della bobina presente nel circuito per provocare la caduta della restante tensione, e quindi il soppressore avrà la sua migliore collocazione come si vede in figura. Il procedimento di scelta del varistor GE-MOV®II avverrà come segue:

SOLUZIONE

Tensione di esercizio

La tensione della linea a 117 V sarà, con un aumento del 10%, di 129 V. La tensione nominale più vicina sarà 130 V.

Energia e corrente

L'induttanza della bobina da 100 μH apparirà al transitorio come una resistenza di circa 30 Ω. Questo valore di 30 Ω deriva dalla reattanza induttiva alla frequenza del generatore di transitorio, che è di $10^5\pi$ radianti. Facendo una stima preliminare della corrente di picco nel varistor, avremo un valore di 2500 V/80 Ω = 31 A. (Questa prima valutazione è alta, dato che si assume che il valore della tensione di

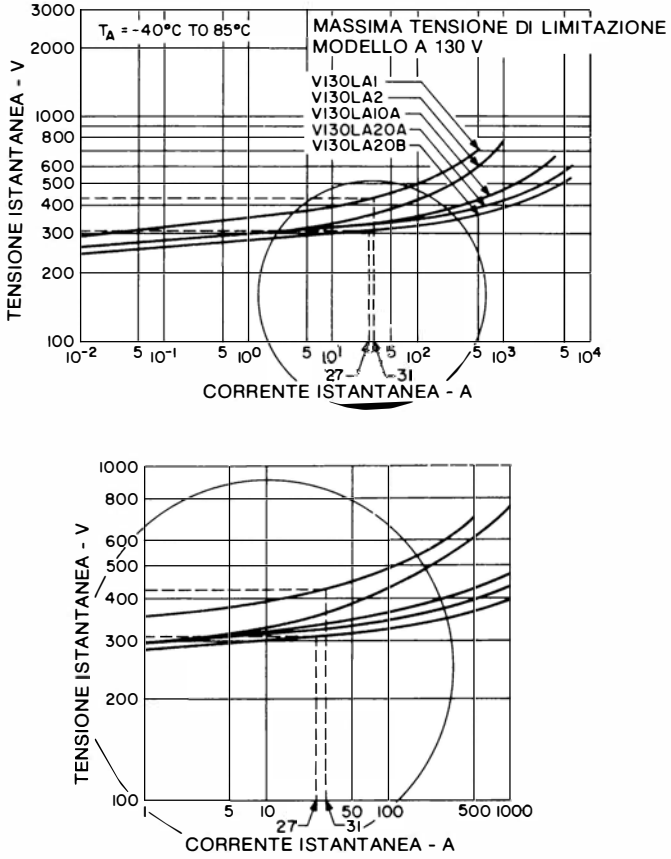


Figura 4.17 - Caratteristiche V-I di un varistor V130LA.

limitazione del varistor sia zero). Tentando come prima scelta un varistor GE-MOV® II da 130 V, troviamo che ad una corrente di 31 A corrisponde una tensione che va da 325 a 430 V, a seconda delle dimensioni del componente, come si può vedere in Figura 4.17.

Rivedendo il tentativo, si ha I ~ (2500 V - 325 V)/80 Ω = 27,2 A. Per il tipo V130LA20B, la corrente di 27,2 A coincide quasi perfettamente con il livello di limitazione a 320 V. Se la scelta finale cade sul tipo B, sarà necessario perfezionare ulteriormente il calcolo.

Per arrivare ad una cifra per l'energia, si immagini una corrente a denti di sega

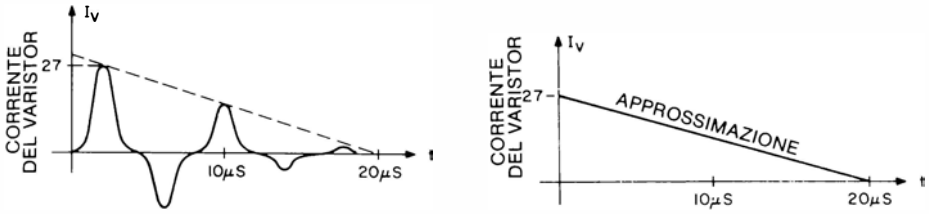


Figura 4.18 - Approssimazione dell'andamento dell'energia.

con 27 A di picco, che scenda a livello zero in due costanti di tempo ovvero in 20 μs. L'energia è approssimativamente uguale a (27 A x 320 V x 20 μs)/2, ossia all'area sottostante la forma d'onda della potenza. Il risultato è 0,086 J e quindi ben al di qua della possibilità del varistor (50 J). Anche la corrente di picco sta dentro al limite della corrente nominale di 6000 A.

Scelta del tipo

L'effettiva scelta del varistor è un compromesso tra la tensione di limitazione che si vuole ed il numero di impulsi di corrente transitoria che si prevede avverranno durante la vita dell'apparecchiatura. Un varistor dimensionato a 50 J limiterà la tensione a 315 V e potrà sopportare più di 10^5 impulsi di questo genere. Un elemento da 8 J limiterà a circa 385 V e potrà sopportare 1000 impulsi. Inoltre le tensioni di limitazione determinano il costo del raddrizzatore in quanto stabiliscono la tensione nominale di questo. Un varistor piccolo e di poco prezzo può avere come conseguenza un diodo raddrizzatore con una maggiore tensione inversa e quindi più costoso.

4.4.2 Controllo di velocità di un motore con SCR

PROBLEMA: Il circuito di Figura 4.19 ha sofferto di avarie ai raddrizzatori ed all'SCR, all'interruzione del primario del trasformatore. Il fabbricante ha provato ad usare componenti a 600 V ottenendo scarsi miglioramenti.

SOLUZIONE: Aggiungere un varistor al secondario del trasformatore per limitare il picco transitorio di tensione induttivo del trasformatore. Scegliere il varistor GE-MOV® II di minor tensione che sia uguale o maggiore alla massima tensione secondaria del trasformatore. La serie V130LA soddisfa a questi requisiti.

Determinare la tensione transitoria di picco del soppressore prodotta dalla sorgente di energia transitoria ritenendo come caso più sfortunato la condizione di corrente nulla nel carico. La corrente zero nel carico è in genere un presupposto valido. Poiché l'impedenza dinamica ai transitori del varistor GE-MOV® II è in genere piuttosto bassa, il carico in parallelo di maggior impedenza potrà essere trascurato.

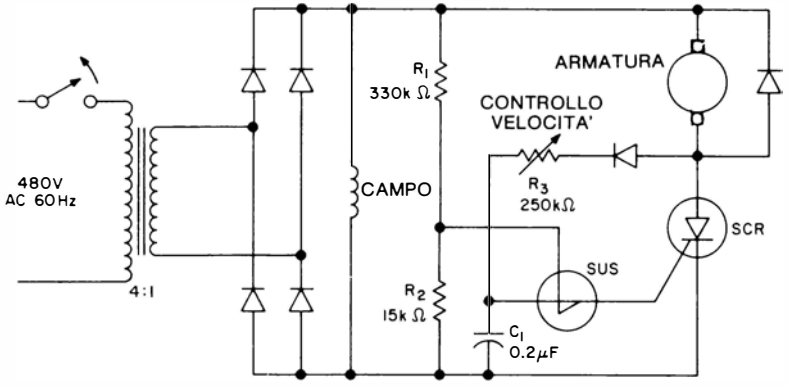


Figura 4.19 - Controllo di motore mediante SCR.

Calcolo della corrente transitoria di picco

Dato che la corrente del transitorio ha origine nell'energia accumulata nel nucleo del trasformatore, un circuito equivalente per quest'ultimo, come si vede in Figura 4.20, sarà molto utile per l'analisi. L'energia induttiva immagazzinata è:

$$E_{Lm} = \frac{1}{2} L_m \hat{I}^2 m$$

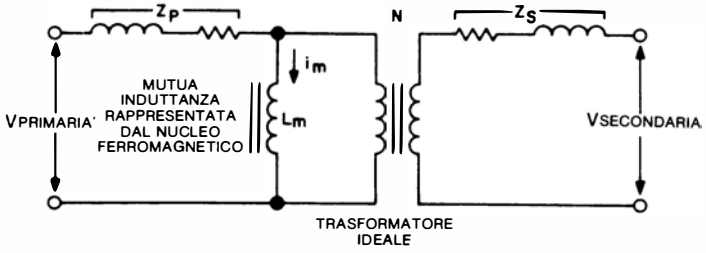


Figura 4.20 - Circuito equivalente semplificato di un trasformatore.

Il progettista deve conoscere l'energia totale accumulata e la corrente di picco trasformata nel circuito secondario a causa dell'induttanza mutua L_m. In mancanza di carico, la corrente magnetizzante I_{NL} è di tipo essenzialmente reattivo ed è uguale ad i_m. Con questo si assume che la resistenza del rame dell'avvolgimento primario, la reattanza di perdita e la perdita resistiva equivalente del nucleo siano piccole rispetto ad L_M. Questa è un ipotesi valida per tutti i trasformatori di controllo, tranne i più piccoli. Dato che I_{NL} si ritiene puramente reattiva, si avrà:

$$X_{LM} = \frac{V_{pri}}{I_{NL}}$$

ed

$$i_m = I_{NL}$$

I_{NL} può essere desunta dai dati di targa. Quando questi non sono disponibili il progettista potrà avere una guida nelle Figure 4.21 e 4.22.

Supponendo che per un trasformatore da 20 kVA con primario a 480 V c.a. e secondario a 120 V c.a., la corrente magnetizzante abbia un valore del 3,5%, come risulta dalla Figura 4.22, si avrà:

$$\begin{aligned}
i_m &= (0{,}035)\,\frac{20\ \text{kVA}}{480\ \text{V}} \\
&= 1{,}46\ \text{A} \\
\hat{i}_m &= \sqrt{2}\, i_m \\
X_{Lm} &= 480\ \text{V}/1{,}46\ \text{A} \\
&= 329\ \Omega \\
L_m &= X_{Lm}/\omega \\
&= 0{,}872\ \text{H} \\
E_{Lm} &= \frac{0{,}872\,(2{,}06)^2}{2} \\
&= 1{,}85\ \text{J}
\end{aligned}$$

Provvisti di queste informazioni si può scegliere la tensione nominale appropriata per il semiconduttore e l'energia occorrente per il varistor.

Tensione inversa del semiconduttore

La corrente di picco del varistor è uguale alla corrente magnetizzante del trasformatore riportata al secondario, ossia $\hat{i}_m(N)$ ovvero 8,24 A. Dalla Figura 4.17 si ricava che, scegliendo il V130LA10A, la tensione di picco del transitorio dopo la

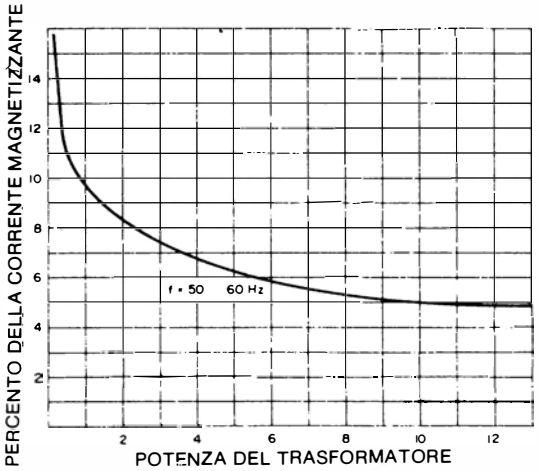


Figura 4.21 - Corrente magnetizzante in trasformatori con nucleo a basso contenuto di silicio.

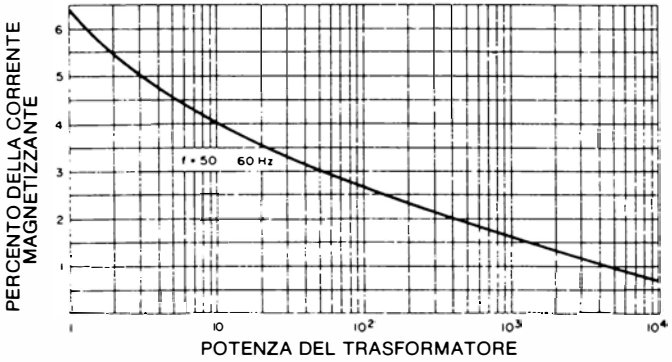


Figura 4.22 - Corrente magnetizzante in trasformatori con nucleo ad alta percentuale di silicio o con ciclo di isteresi rettangolare.

soppressione sarà di 310 V, mentre con il V130LA20B questo sarà di 295 V. In questo modo si possono usare semiconduttori a 300 V nominali. Con l'impostazione discussa in precedenza risultano dei margini di sicurezza dovuti ai seguenti presupposti:

(1) Tutta l'energia disponibile per mutua induttanza viene trasferita al varistor. Per l'isteresi del nucleo e la capacità dell'avvolgimento secondario ne risulteranno invece disponibili meno di due terzi.

(2) La corrente di eccitazione non è del tipo reattivo puro. Nella previsione della corrente di picco c'é un margine di sicurezza che va dal 10% al 20%.

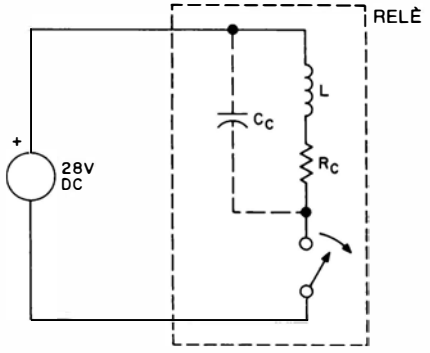
Dopo la determinazione della tensione e della corrente di picco occorrerà ora puntualizzare i requisiti di energia e di dissipazione di potenza. Per l'esempio in questione l'energia dell'impulso è molto al di sotto di quella nominale del varistor V130LA10 che è di 30 J ad una temperatura massima ambiente di 85° C. I requisiti di dissipazione media di potenza rispetto alla potenza minima non sono necessari in quanto il transitorio previsto non è di natura ripetitiva. Se il transitorio dovesse essere ripetitivo si calcola la potenza media facendo il prodotto del tasso di ripetizione per l'energia del transitorio. Se questo valore supera le possibilità del V130LA20A (0,85 W), si dovrà ricorrere ai varistori di potenza (serie PA).

Se la temperatura ambiente dovesse superare gli 85° C oppure se questo valore fosse superato dalla temperatura superficiale, occorre abbassare le prestazioni energetiche ad impulso singolo e quelle di potenza media di un adatto fattore che si troverà sul foglio dati del V130LA20A.

4.4.3 Archi di contatti dovuti a carico induttivo

Quando per il controllo di carichi induttivi si usano relé o commutatori meccanici, occorre usare i contatti per una corrente di circa il 50% di quella ammessa per carico resistivo, in modo da ridurre il logorio dovuto agli archi sui contatti. L'energia dell'arco è proporzionale all'induttanza ed al quadrato della corrente.

Ogni volta che si interrompe la corrente in un carico induttivo per mezzo di contatti meccanici, la tensione tra i contatti aumenta secondo -L di/dt. Quando si sviluppa l'arco sui contatti, la tensione tra questi diminuisce e la corrente nella bobina cresce di una certa quantità. Lo spegnimento dell'arco provoca un ulteriore transitorio di tensione che può provocare la ripresa dell'arco tra i contatti. Non è insolito che queste riprese d'arco avvengano molte volte facendo in modo che



Cc = CAPACITA' DISPERSA
L = INDUTTANZA DELLA BOBINA DEL RELÈ
Rc = RESISTENZA DELLA BOBINA DEL RELÈ

Figura 4.23 - Circuito di relé.

l'energia totale dell'arco sia un multiplo anche elevato di quella accumulata in origine nel carico induttivo. È proprio l'arco ripetitivo che provoca la distruzione dei contatti.

PROBLEMA: Per aumentare la vita dei contatti del relé mostrato in Figura 4.23 e per ridurre l'irriadiamento dei disturbi, si vuole eliminare l'arco ai contatti.

Nell'esempio abbiamo $R_C = 30\ \Omega$ ed i contatti del relé possono sopportare circa 1 A. Ai contatti si sviluppa un arco all'apertura quanto la corrente sia maggiore di circa 0,4 A o la tensione maggiore di 12 V. L'arco continua fino a quando la corrente cade al di sotto degli 0,4 A.

SOLUZIONE: Per evitare l'inizio dell'arco occorre ridurre la corrente e la tensione ai contatti al di sotto dei livelli di soglia dell'arco al momento dell'apertura, e mantenerle al di sotto della soglia di scarica tra i contatti quando questi sono aperti. Per raggiungere questo risultato vengono a mente due tecniche ovvie: 1) usare una grande capacità in parallelo ai contatti e 2) limitare la tensione (per esempio con un varistor). La tecnica di limitazione potrà essere efficace solo quando la tensione minima dell'arco supera la tensione di alimentazione.

Nell'esempio in questione, un dispositivo limitatore che funzioni ad una tensione superiore a quella di alimentazione non eviterà la formazione dell'arco. Tutto questo è chiarito nella Figura 4.24.

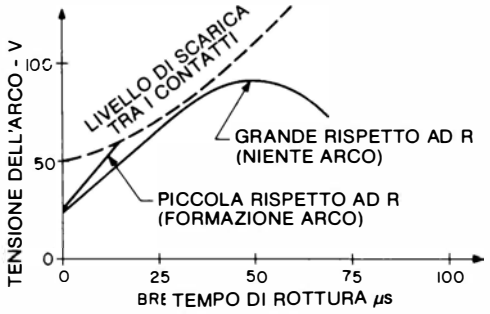
Figura 4.24 - Limitatore di tensione usato per la soppressione degli archi.

L'impiego di un condensatore richiede una capacità sufficientemente grande da condurre la corrente dell'induttanza con un tasso di aumento della tensione che approssimi il tasso di aumento della tensione di scarica ai contatti quando questi vengono allontanati meccanicamente. Per chiarimenti osservare la Figura 4.25 (a).

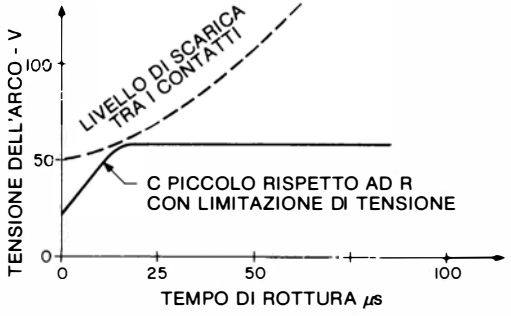
Le limitazioni che affliggono l'uso del condensatore sono le dimensioni ed il costo. Questo è particolarmente vero nei casi di elevata energia induttiva. Inoltre, l'uso del solo condensatore di elevata capacità provoca grandi correnti di scarica

alla chiusura dei contatti, quando questi rimbalzano. Ne può risultare la fusione dei contatti con successiva saldatura. Per evitare questo passaggio a raffica della corrente, si è soliti aggiungere una resistenza in serie per limitare la corrente di scarica capacitiva. Questo componente addizionale riduce però l'efficacia del circuito e ne aumenta il costo.

Una terza tecnica, che non è così ovvia come le due precedenti, è di impostare la soluzione usando una combinazione di componenti. Questa tecnica, mostrata in



(a) Soppressione dell'arco con circuito R-C



(b) Soppressione dell'arco mediante R-C + limitatore

Figura 4.25 - Tecniche di soppressione delle tensioni di arco sui relé.

Figura 4.25(b) mette un dispositivo limitatore di tensione in parallelo ad un circuito R-C. In questo modo il circuito R-C eviterà l'arco iniziale a bassa tensione ed il limitatore sopprimerà l'arco che potrebbe formarsi più tardi quando sale la tensione al condensatore. Una tale impostazione è spesso più economica ed affidabile rispetto all'uso di un grosso condensatore.

Con i relé di potenza in alternata l'impedenza di un grosso soppressore R-C dovrebbe essere inoltre talmente bassa da permettere un eccessivo passaggio di

corrente a contatti aperti. L'uso di un piccolo circuito R-C in unione con un varistor risulta anche in questo caso vantaggioso.

Nell'esempio che prendiamo in considerazione, l'arco verrà completamente soppresso da un condensatore di 0,22 μF e da una resistenza da 10 Ω. Riducendo però la capacità a 0,047 μF, l'arco si svilupperà a 70 V.

Quindi, per usare un varistor come limitatore in unione al circuito R-C, esso dovrà ridurre la tensione al di sotto dei 70V ad 1 A, e dovrà avere la possibilità di funzionare ad una tensione massima di regime di 28 V + 10% oppure a 30,8 V (ritenendo di avere a disposizione un alimentatore stabilizzato in c.c.a 28 V ± 10%).

Scelta del varistor

I due tipi che hanno le caratteristiche più vicine a quelle richieste in precedenza sono i modelli V39MA2B di tipo assiale ed il modello V39ZA1 della serie ZA: entrambi hanno la tensione massima nominale di esercizio in c.c. di 31 V. La caratteristica V-I ad 1 A del V39MA2B mostra una tensione massima di 73 V mentre questa tensione è di 67 V per il V39ZA1. La scelta cade quindi su quest'ultimo tipo. Un condensatore da 0,068 μF al posto di quello da 0,047 μF permetterà di usare il varistor V39MA2B.

La sistemazione del solo varistor GE-MOV® II a 21 V c.c. tra i contatti avrà come risultato lo sviluppo dell'arco al di sopra del livello dei 66 V. Combinando i due sistemi verranno ridotte le dimensioni e la tensione del condensatore mentre la soppressione sarà totale.

Oltre a stabilire la tensione del varistor e l'eliminazione dell'arco, il progettista dovrà prendere in considerazione l'energia e la corrente di picco. L'energia del varistor si determina misurando l'induttanza della bobina ed eseguendo il seguente calcolo: $E = 1/2\ L\ i^2$. La corrente di picco è naturalmente inferiore ad 1 A. La dissipazione di potenza è trascurabile a meno che l'interruzione della bobina non sia molto frequente (parecchie volte al minuto).

Nei casi in cui si abbia la formazione di archi multipli, l'energia del varistor dovrà essere un multiplo del suddetto valore $1/2\ L\ i^2$. La corrente di picco è largamente compresa nelle prestazioni dei varistori serie MA oppure ZA, ma il numero degli azionamenti dei contatti ammissibile per entrambi i varistori è una funzione della durata di impulso. Questa può essere valutata stabilendo una costante di tempo L/R_C alla corrente di 1 A oppure alla corrente di picco. Dato che la tensione ai capi del varistor è di 67 V ad 1 A, la resistenza statica del varistor è di 67 Ω. Il valore R_C della bobina è pari a 28 V/1A ovvere 28 Ω. L'induttanza della bobina è stata misurata in 20 mH. La costante di tempo approssimativa sarà quindi:

$$\tau = L/R_C = \frac{20\ \text{mH}}{95} = 210\ \mu\text{s}$$

Dalla curva del numero di impulsi-durata del modello V39ZA1, il numero di impulsi ammessi supera i 100 milioni.

4.4.4 Soppressione dei disturbi

È esperienza comune che l'interruzione della corrente mediante contatti meccanici provoca disturbi in un sistema elettromeccanico. Quando i contatti di un interruttore si aprono, se la corrente è sufficientemente alta, può avvenire un arco a catodo caldo. D'altra parte una bassa corrente permetterà l'apertura del contatto senza formazione di arco, ma con oscillazioni transitorie dovute alla risonanza del circuito. Queste a loro volta potranno provocare un aumento della tensione al di sopra del valore di scarica nello spazio tra i contatti dando origine ad un'imitazione dei vecchi trasmettitori a scintilla. È proprio il caso della bassa corrente che produce i più fastidiosi disturbi elettromagnetici nelle apparecchiature elettriche. Questi impulsi causano problemi di disturbo sulle linee adiacenti, fanno partire i tiristori ed i Triac e danneggiano i semiconduttori. Inoltre essi possono cagionare catastrofi nel funzionamento dei microprocessori causando perdite nella memoria e la distruzione di istruzioni vitali.

PROBLEMA: La commutazione di un piccolo motore di temporizzatore da 120 V, 60 Hz provocava seri inconvenienti nel funzionamento di un apparecchio elettronico alimentato dalla stessa linea elettrica. Sono stati fatti dei tentativi per osservare con un oscilloscopio il disturbo transitorio sulla linea, come primo passo nella soluzione del problema. Le forme d'onda osservate erano alquanto ingarbugliate e quindi non chiaramente identificabili.

SOLUZIONE: Si è costruito un circuito di prova (Figura 4.26) con elementi concentrati in sostituzione dei valori misurati sul circuito effettivo. L'impedenza del motore è stata simulata da R_1, L_1 e C_1, mentre L_2 e C_2 sostituivano l'impedenza della linea. Un alimentatore in continua permetteva osservazioni ripetibili nell'inte-

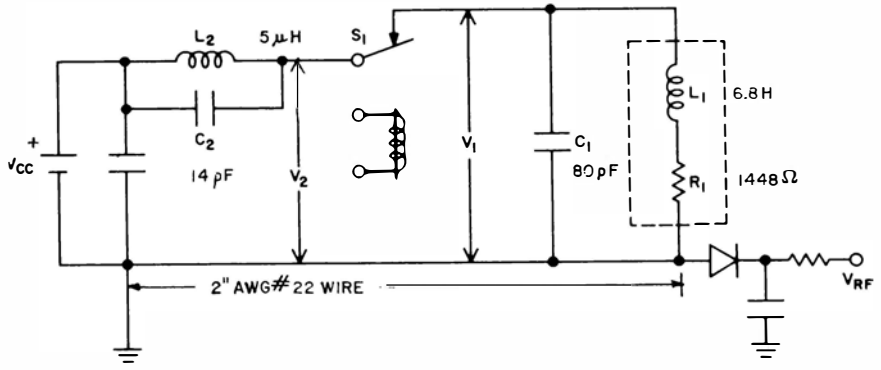
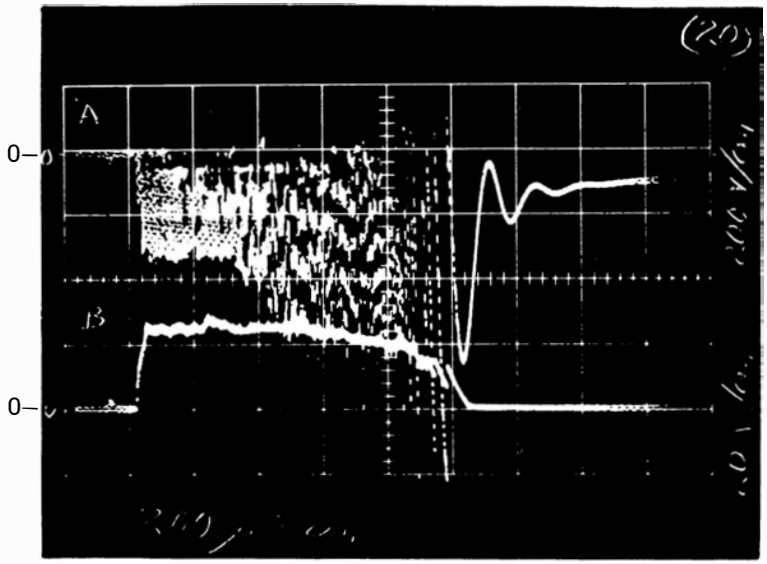
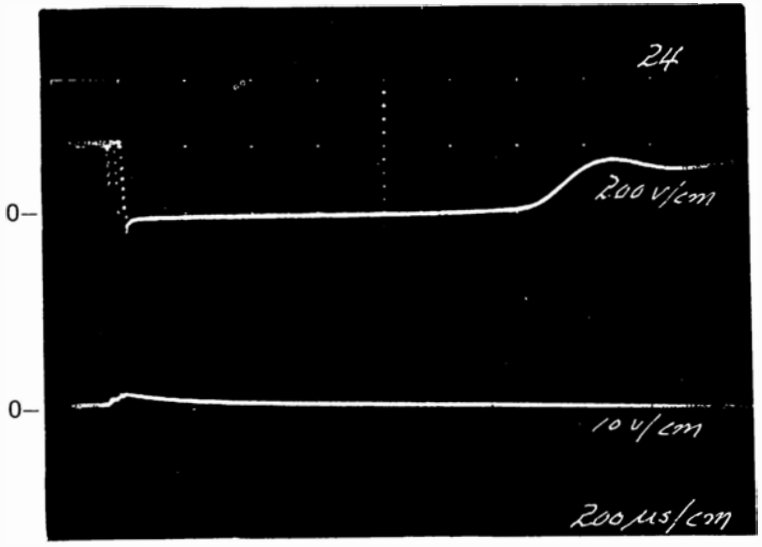


Figura 4.26 - Circuito di prova.



Superiore V_1: **200 V/cm**
Inferiore V_{RF}: **20 V/cm**
t: **0.2 ms/cm**

Figura 4.27 - Contatti privi di protezione.



Superiore V_1: **200 V/cm**
Inferiore V_{RF}: **20 V/cm**
t: **0.2 ms/cm**

Figura 4.28 - Contatti protetti da un varistor GE-MOV®.

ro campo della corrente che poteva passare attraverso l'interruttore nel normale funzionamento in c.a. Un rivelatore a diodo è stato usato per osservare la tensione a radio frequenza che si sviluppa ai capi di un filo lungo 5 cm (induttanza 50 nH).

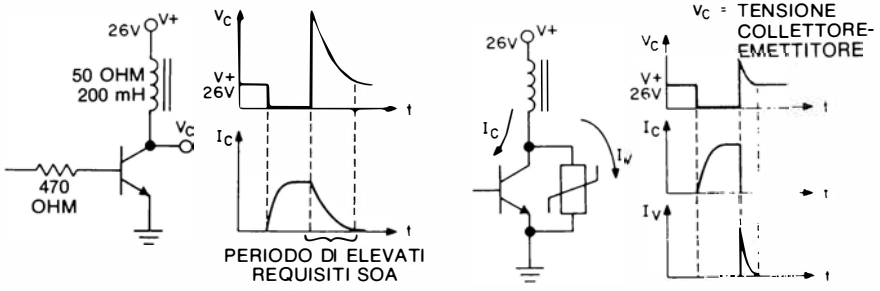
L'alimentazione è stata regolata a 25 mA per rappresentare la corrente di picco del motore nel funzionamento normale a 120 V c.a. All'apertura dell'interruttore S1, è stata registrata la forma d'onda di figura 4.27. Notare l'effetto di arco a "mitraglia". La maggior tensione di scarica registrata è stata di 1020 V, e la massima uscita dal rivelatore di radio frequenza (traccia inferiore) è di 32 V.

Si deve quindi intraprendere qualche misura correttiva e la più efficace sarebbe quella che potesse evitare la scarica multipla tra i contatti. La Figura 4.28 mostra la forma d'onda di V_I (traccia superiore) e di V_{RF} (traccia inferiore) alle medesime condizioni di prova, ma con l'impiego di un varistor GE-MOV® II tipo V130LA10 collegato direttamente in parallelo al contatto dell'interruttore. Il varistor elimina completamente le oscillazioni di rilassamento, mantenendo la tensione al di sotto del valore di scarica (circa 300 V), e dissipando inoltre l'energia accumulata nel sistema.

4.4.5 Protezione dei transitori nella commutazione di carichi induttivi

PROBLEMA: Il transistor di Figura 4.29 deve far funzionare un solenoide. La cadenza di funzionamento è di una commutazione al secondo. Il circuito, senza la soppressione provoca consistenti danni al transistor.

L'induttanza eleva la tensione di collettore del transistor quando la base è mandata a massa (situazione di interdizione). L'induttanza tende a prolungare il passaggio di corrente fino a quando non sia dissipata l'energia in essa accumulata. Questa energia è dissipata nella condizione di polarizzazione inversa del transistor ed è sufficiente a causare una scarica attraverso la giunzione (indicata dalla brusca diminuzione della tensione di collettore durante l'impulso).



(a) Circuito base a solenoide

(b) Circuito a solenoide con protezione a varistor

Figura 4.29 - Commutazione a transistor di un carico induttivo.

SOLUZIONE: Questa situazione può essere cancellata sia mettendo un soppressore in parallelo al transistor che commutandolo in conduzione con un varistor collegato tra collettore e base. Il primo sistema riduce notevolmente le restrizioni riguardanti la "zona di funzionamento sicuro" (SOA = Safe Operating Area) del transistor. Se la tensione viene mantenuta inferiore a quella di scarica, tutta l'energia verrà dissipata nel soppressore. Il secondo sistema farà dissipare l'energia dal transistor, ma nella condizione di polarizzazione diretta, per cui potrà avvenire con sicurezza la dissipazione di una limitata quantità di energia. La scelta è determinata da fattori di economia e di affidabilità. Un soppressore collegato tra collettore ed emettitore (C-E) sarà più costoso di quello tra collettore e base (C-B), perché deve assorbire più energia ma provocherà una riduzione del SOA del transistor.

Se si usa un varistor disposto tra collettore ed emettitore del transistor dell'esempio precedente, esso dovrà resistere nel peggiore dei casi a 28,6 V c.c. (26 + 10% di regolazione). L'energia accumulata è $1/2\ L\ i^2$ ossia $1/2\,(0{,}20)\,(0{,}572)^2 = 0{,}0327$ J. Il contributo energetico dell'alimentatore è approssimativamente uguale (tensione alla bobina $\approx$ tensione di alimentazione, dato che la tensione di limitazione del varistor è circa doppia della tensione di alimentazione). Per una valutazione di massima trascuriamo le perdite resistive della bobina, e perciò la dissipazione di energia nel varistor è di 0,065 J per ogni impulso. La corrente di picco sarà di 0,572 A, la stessa che passa nella bobina all'interdizione del transistor.

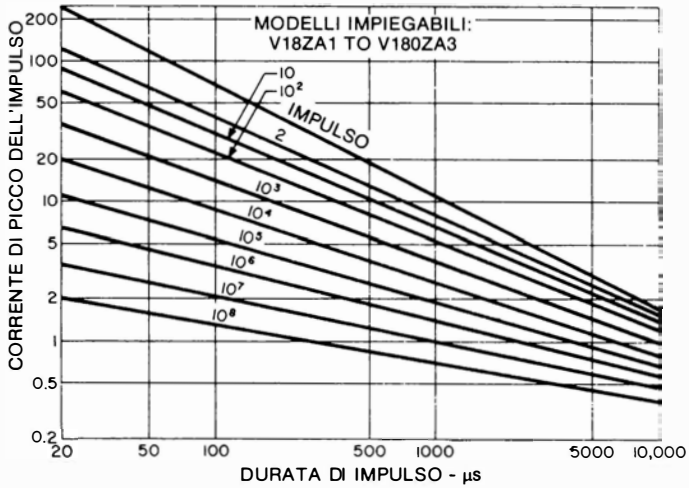
Se il transistor è fatto funzionare una volta al secondo, la dissipazione media di potenza nel varistor sarà di 0,065 W. Questo valore è inferiore alla dissipazione di 0,20 W di un piccolo varistor a 31 V c.c. (V39ZA1). Dal foglio dati si può rilevare che, se la temperatura del componente supera gli 85° C, occorre effettuare una riduzione delle prestazioni. L'energia in caso di non ripetizione è di 1,2 J, valore che è molto maggiore di quello in regime ripetitivo. Per determinare l'energia dissipabile in regime ripetitivo si devono consultare le curve che mettono in relazione gli impulsi di corrente e la vita utile per la serie ZA. Queste sono riprodotte in Figura 4.30.

Per poter usare la Figura 4.30 si valuta la durata dell'impulso (fino al punto del 50%) ricorrendo alle costanti di tempo del circuito, e si trova che questa durata è di 1240 μs. Dalla Figura 4.30(a), si prevede che la vita utile si estenderà leggermente oltre le 10^8 operazioni. Poiché questo potrebbe non essere adeguato, il progettista potrà orientare la sua scelta al varistor di misura immediatamente superiore (V39ZA6). Alla corrente di 0,572 A la durata approssimativa dell'impulso sarà di 1280 μs e, consultando la Figura 4.30(b), il progettista si trova di fronte al problema di estrapolare su valori inferiori ad 1 A. Questo è stato fatto in Figura 4.31, sulla quale appare un nuovo tracciato dei dati di Figura 4.30(b) a 1280 μs.

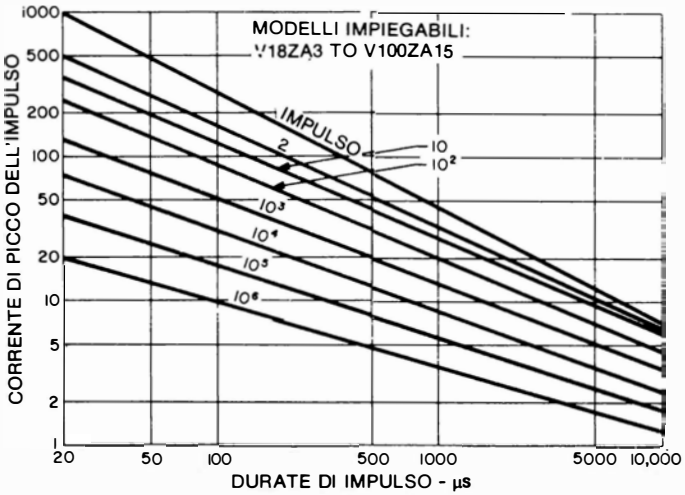
La conclusione è che la vita utile supera le 10^9 interruzioni. Il lettore potrà porsi delle domande circa l'estrapolazione su quattro ordini di grandezza. Alle correnti

molto basse la relazione viene estrapolata con una linea retta su diagramma doppio logaritmico, come si vede in Figura 4.30(a), nella quale le curve della vita utile arrivano fino a 10^8 impulsi.

Le caratteristiche di limitazione del modello V39ZA6 daranno un valore di picco di 61 V massimi. Il transistor dovrà avere una V_{CER} di 65 V o più per poter essere usato in questo caso.



(a) V18ZA1 To V180ZA3



(b) V18ZA3 To V100ZA15

Figura 4.30 - Vita utile in rapporto al numero di impulsi per la serie ZA.

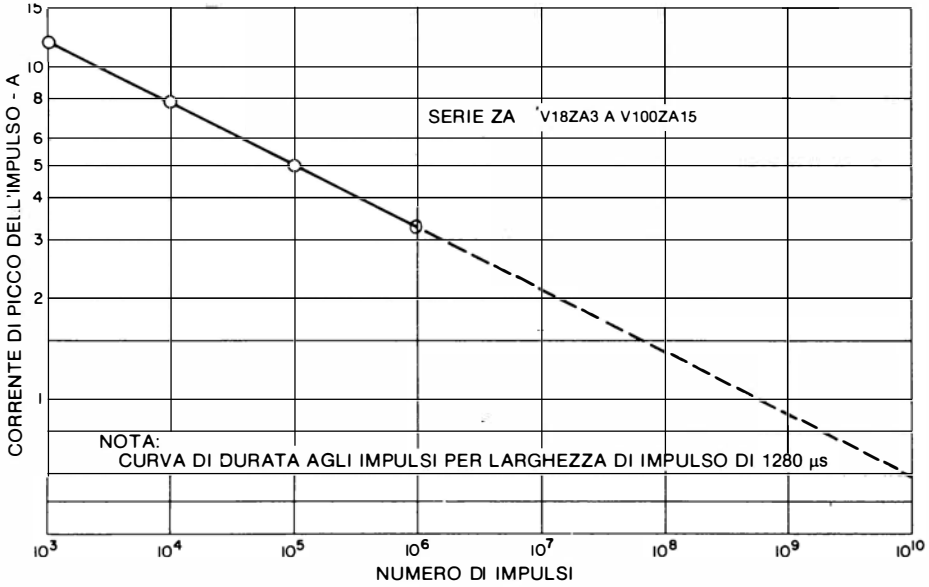


Figura 4.31 - Curva di vita ad impulsi estrapolata.

4.4.6 La protezione dei motori

Molto spesso le cause di avaria dei motori elettrici possono essere attribuite a perforazioni dell'isolamento tra le spire degli avvolgimenti. L'origine dei transitori che provocano la perforazione può risiedere nel campo magnetico accumulato internamente oppure in cause esterne. Questo paragrafo tratta dei transitori autogenerati dall'avviamento del motore o dall'interruzione del circuito. I transitori di origine esterna ed il loro controllo sono trattati nel Capitolo 2.

Nel caso dei motori in c.c. il circuito equivalente è formato da una sola diramazione. L'energia immagazzinata in forma di campo magnetico può essere agevolmente calcolata nei circuiti di armatura o di campo usando i dati di targa del motore. Con i motori ad induzione in c.a. il circuito magnetico equivalente al motore è un pochino più complicato, e le costanti del motore si trovano di rado sulla targa. Le Figure 4.32 4.33 e 4.34, ricavate dai dati normali dei motori ad induzione, forniscono una guida alla loro protezione. Mentre l'energia effettivamente accumulata varierà a seconda delle dimensioni del motore e delle tecniche costruttive, queste curve danno le loro indicazioni anche se si ignorano i dati del particolare motore in considerazione. I dati sono prudenziali in quanto si riferiscono alla massima coppia del motore, una condizione che non è affatto di esercizio normale. L'energia accumulata cala notevolmente quando diminuisce il carico del motore. L'esperienza fatta con la soppressione dell'energia magnetica accumulata

nei trasformatori dimostra che si possono usare i varistori GE-MOV® II alle loro prestazioni massime anche quando necessitano interventi multipli. Questo grazie alla prudenza dimostrata nello stabilire i requisiti applicativi e le prestazioni dei varistori. Non si fa quindi nessun tentativo di declassare il varistor in caso di interventi multipli a causa del carattere casuale del valore dell'energia dei transitori, che risulta dall'esperienza.

Per favorire la scelta della giusta tensione di funzionamento dei varistori GE-MOV® II, la Figura 4.35 fornisce le linee direttrici riguardanti motori collegati a stella oppure a triangolo, e per diverse tensioni di fase. La Figura 4.36 dà una guida per il corretto piazzamento del varistor.

L'interruzione della corrente all'avviamento del motore mette l'utente di fronte a problemi particolari, come si può vedere in Figura 4.34. Dato che i valori dell'energia magnetica immagazzinata sono circa decupli di quelli che si hanno durante la

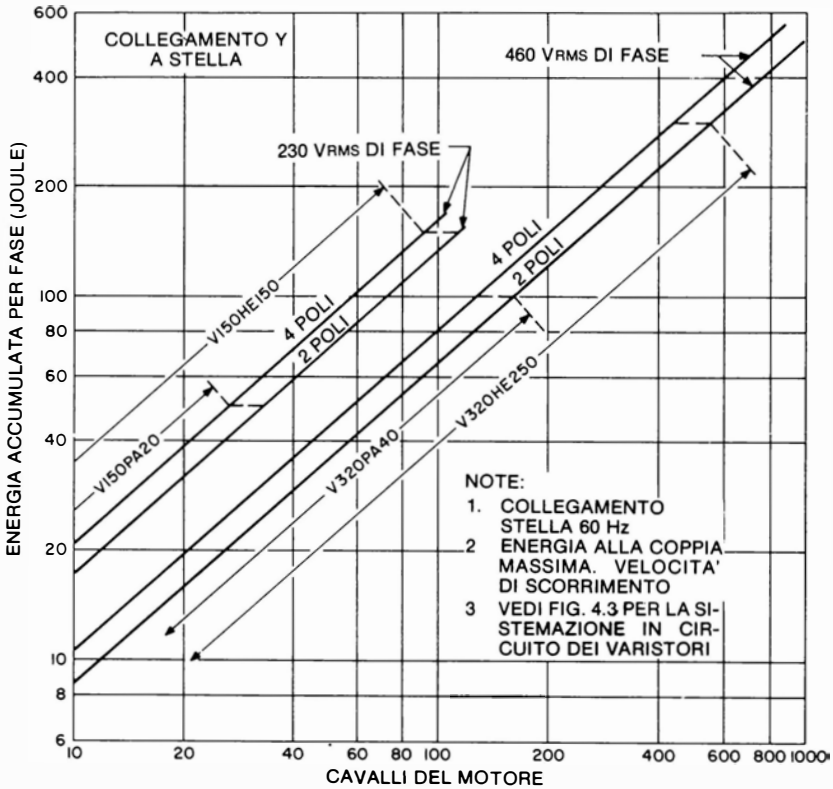


Figura 4.32 - Curve dell'energia accumulata per tipici motori ad induzione con avvolgimento a stella.

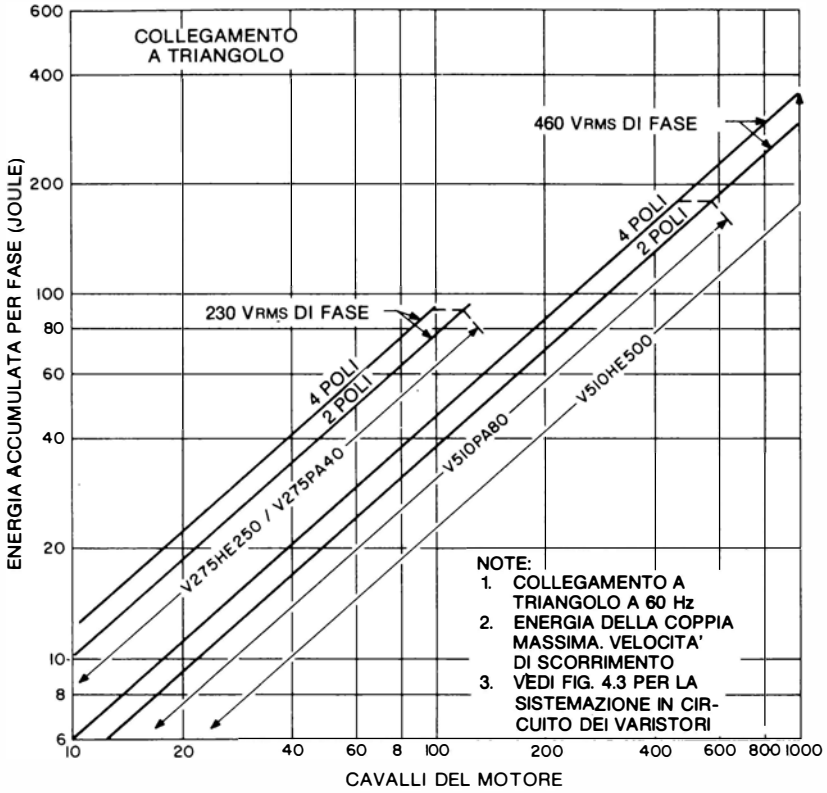


Figura 4.33 - Curve dell'energia accumulata per tipici motori ad induzione con avvolgimento a triangolo.

marcia a regime, alle alte potenze del motore la protezione si rivelerà difficile. Spesso il motore viene avviato mediante una tensione ridotta che ridurrà sensibilmente il valore dell'energia accumulata. Una diminuzione della metà della corrente di avviamento provoca la riduzione a un quarto dell'energia accumulata. Se non si usa un sistema di avviamento a tensione ridotta, occorrerà prendere una decisione: se proteggere il motore alle sole condizioni di regime oppure per la corrente che si ha a rotore bloccato. Nella maggioranza delle applicazioni si può ignorare la condizione di avviamento, badando invece a scegliere il varistor per le condizioni di marcia nel caso di massima sollecitazione.

PROBLEMA: Proteggere un motore a due poli da 75 hp, tre fasi, 460 V efficaci tra le fasi, collegamento a stella dai transitori dovuti ad interruzione della rotazione.

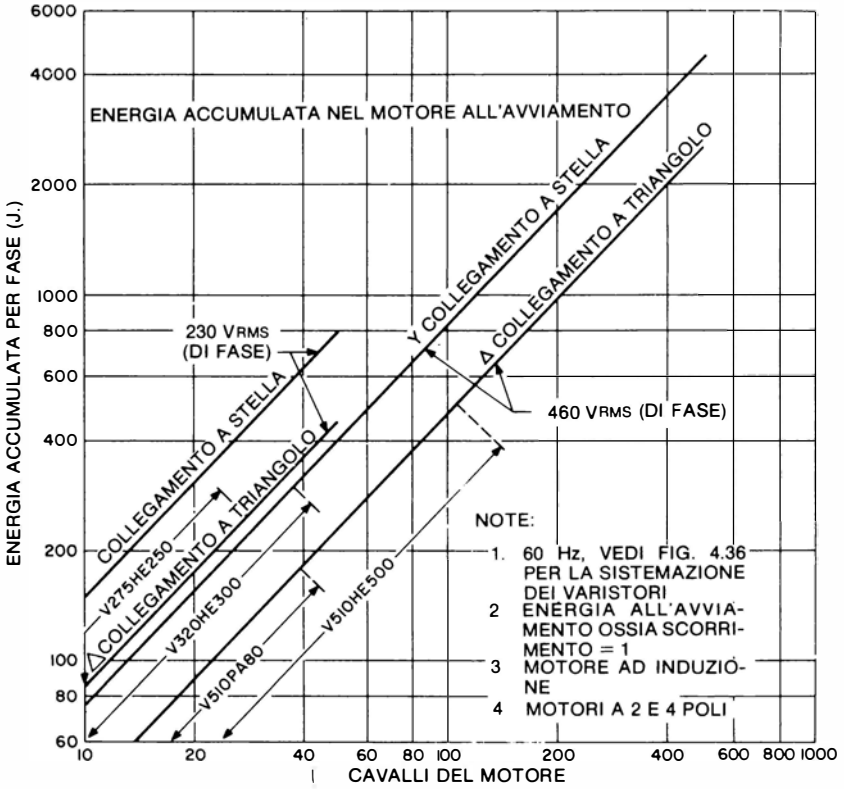


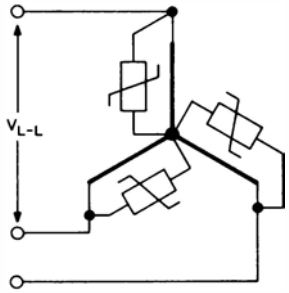
Figura 4.34 - Curve dell'energia accumulata per un tipico motore a rotore fermo.

I dati tecnici del motore non sono disponibili

SOLUZIONE: Consultare la Figura 4.32 insieme alla Figura 4.35. I varistori di serie che hanno il dimensionamento in tensione richiesto sono quelli a tensione nominale di 320 Veff.. Questi ammettono una sovratensione sulla rete del 20% rispetto alla tensione nominale di fase di 460 V, corrispondente ad una tensione di 266 V tra fase e neutro. Dalla Figura 4.32 si ricava che un motore ad induzione da 75 cavalli a due poli collegato a stella, ha, in regime normale di rotazione, un'energia magnetica immagazzinata per fase di 52 J. A questo requisito corrispondono sia i varistori della serie V320 PALO che quelli della serie V320HE250. I varistori GE-MOV® II della serie HE consentono un maggior margine di sicurezza, per quanto anche quelli della serie PA corrispondano in pieno alle condizioni di questa applicazione. Saranno necessari tre varistori collegati direttamente tra i terminali di alimentazione del motore, come si vede in Figura 4.36(a).

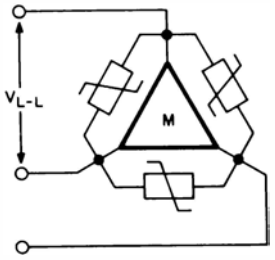
TENSIONE EFFICACE DI FASE	→	230	380	460	550	600
COLLEGAMENTO A TRIANGOLO	TENSIONE APPLICATA	230	380	460	550	600
	TENSIONE DEL VARISTOR	250/275	420/460	510/550	575/660	660
COLLEGAMENTO A STELLA	TENSIONE APPLICATA	133	220	266	318	346
	TENSIONE DEL VARISTOR	150	250/275	320	420	420

Figura 4.35 - Tensioni preferite dei varistori da applicare a motori collegati a triangolo od a stella.



$V_{VARISTOR} = \frac{1}{\sqrt{3}} V_{L-L}$

(a) Collegamento a stella



$V_{VARISTOR} = V_{L-L}$

(b) Collegamento a triangolo

Figura 4.36 - Sistemazione dei varistori sulle tre fasi di un motore ad induzione.

4.4.7 Barra di blocco su alimentatore

Talvolta è possibile che un alimentatore eroghi una tensione eccessiva. Un distacco accidentale del carico potrà danneggiare il resto del circuito. Una semplice misura di sicurezza è di applicare uno scaricatore oppure mettere in cortocircuito le uscite con un SCR. Per l'accensione dell'SCR occorre un rivelatore di alta tensione. I diodi a valanga per alta tensione sono efficaci ma costosi. Un sostituto efficace ed economico è un varistor GE-MOV® II con reofori assiali.

PROBLEMA: Nel circuito di Figura 4.37 la tensione in assenza di protezione può superare il doppio dei normali 240 V di picco, con danneggiamento dei componenti a valle. È mostrata una semplice protezione in parallelo alle uscite, tipo *barra di blocco*.

L'alimentatore di figura può erogare 2 A eff. di corrente di corto circuito, ed è provvisto di protezione da 1 A. Si sceglie un SCR C106 che sopporta una corrente di di 4 A eff. L'accensione avverrà con una tensione tra gate e catodo di almeno 0,4 V, ma non superiore 0,8 V, ad una corrente di 200 μA e temperatura ambiente di 25° C.

SOLUZIONE: Consultare le caratteristiche tecniche di varistori GE-MOV® II della serie MA, cercando un componente che abbia la possibilità di sopportare la tensione di 240 V di picco. Il V270MA4B può lavorare a: $\sqrt{2}$ (171 V eff) = 242 V. Secondo le caratteristiche tecniche di 270 V ± 10%, il V270MA4B condurrà 1 mA in continua a non meno di 243 V. La resistenza tra gate e catodo deve essere scelta in modo da provocare una caduta di 0,4 V (la tensione minima di avviamento) ad una corrente di 1 mA, e l'SCR non si accenderà a meno di 243 V. Di conseguenza R_{GK} dovrà essere inferiore a 400 Ω. Il maggior valore di una resistenza con 5% di tolleranza che cada al di sotto dei 400 Ω è 360 Ω e su questo cade la scelta. Così il valore massimo di R_{GK} potrà essere 378 Ω ed il minimo 342 Ω. La tensione minima di avviamento dell'SCR, cioé 0,4 V richiede un varistor da 0,4 V/378 Ω = 1,6 mA per una tensione massima ai suoi capi di circa 245 V. La tensione massima di azionamento del circuito dipende dalla massima corrente che deve passare il

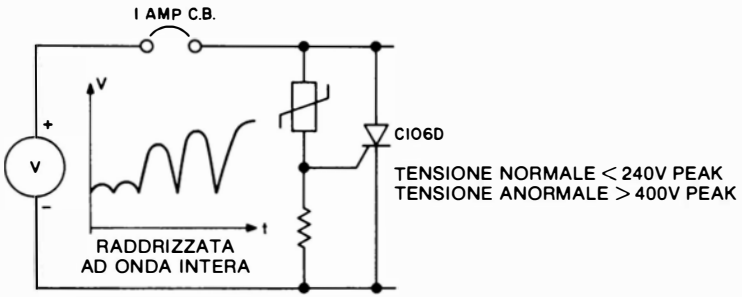


Figura 4.37 - Circuito a barra di blocco (crowbar).

varistor per avviare l'SCR. Per il C106 a 25° C la si determina calcolando la corrente massima occorrente per provocare una caduta di tensione di 0,8 V su di una resistenza in parallelo formata dalla R_{GK} da 360 Ω e la resistenza equivalente gate-catodo dell'SCR di 0,8 V/200 μA, dato che per il C106 occorre una corrente massima di trigger di 200 μA. La resistenza di ingresso al gate dell'SCR è di 4 kΩ e la minima resistenza equivalente gate-catodo deriva dalla messa in parallelo di 4 kΩ e di $R_{GK(min)}$, ovvero 360 Ω -5% = 342 Ω. La combinazione in parallelo ha un valore di 325 Ω; di conseguenza $I_{varistor}$ per la massima tensione occorrente ad accendere il C106 è uguale a 0,8 V/315 Ω = 2,54 mA. Secondo il foglio dati del V270MA4B, con questa corrente non apparirà ai capi del varistor una tensione superiore a 330 V. Il circuito scatterà quindi ad un picco che si trova tra 245 e 330 V; si potrà quindi usare un C106 con 400 V nominali. Il lettore stia sull'avviso circa il fatto che le caratteristiche di gate dell'SCR sono sensibili alla temperatura della giunzione e che il valore di 25° C per la temperatura dell'SCR è stato scelto esclusivamente come un valore conveniente alla dimostrazione del metodo progettuale.

Si può usare la Figura 4.3 per determinare l'energia massima per ogni impulso

con questa forma d'onda. Essa non supererà il seguente valore approssimato: 1/2 x 0,15 x I_{pk} x V_{pk} x τ (durata di mezza onda dell'impulso) ovvero, in questo caso, 0,52 mJ. Dato che in questo caso la tensione non scende a zero, l'SCR resta in conduzione, ed il varistor vede un solo impulso; non si dovranno quindi fare considerazioni di potenza a regime.

4.4.8 Protezione generica dei circuiti a stato solido contro i transitori sulle linee a 117 V c.a.

PROBLEMA: I moderni apparati elettronici e gli impianti domestici contengono circuiti a stato solido suscettibili di funzionare male o di subire danni a causa dei picchi transitori di tensione. Queste apparecchiature si usano in edifici residenziali, commerciali ed industriali. Alcuni progetti di apparecchiature sono degli oggetti di costo relativamente basso destinati al consumo mentre per altri, destinati all'uso commerciale/industriale, occorrerà qualche misura di affidabilità in più. Poiché i circuiti a stato solido ed i relativi problemi di sensibilità ai transitori sono qualcosa di relativamente nuovo, la conoscenza del progetto in ambiente disturbante è ancora incompleta. Sono state adottate da varie agenzie alcune norme di prova (vedi Capitolo 7) ed una più completa definizione dell'ambiente è in corso di elaborazione presso il comitato dei dispositivi di protezione dei fenomeni transitori della IEEE.

I transitori che possono avvenire nelle linee in corrente alternata di edifici residenziali e commerciali potranno mostrare diverse forme d'onda ad essere di intensità variabile per quanto riguarda tensione di picco, corrente od energia. Per gli scopi riguardanti l'applicazione dei soppressori, tutte queste manifestazioni potranno essere ridotte a tre categorie principali.

Per cominciare, il transitorio più frequente potrebbe essere quello rappresentato da un'onda oscillatoria a 30 oppure 100 kHz. Questo transitorio di prova viene definito da un'onda di tensione oscillatoria con caduta esponenziale avente una tensione di picco a circuito aperto di 6 kV. Si può ritenere che quest'onda rappresenti bene i transitori osservati e riferiti in seguito a studi effettuati in Europa ed in Nord-America. Questi transitori possono essere provocati da scariche elettriche atmosferiche lontane oppure da commutazioni che avvengono sulla linea di distribuzione. Per l'impedenza relativamente alta e la breve durata di questi impulsi, la corrente di picco e l'energia sono inferiori rispetto alle categorie seguenti.

La seconda categoria riguarda i transitori prodotti da fulmini relativamente vicini. La gravità dell'impulso dovuto al fulmine è caratterizzata dalla sua corrente di picco. Si può determinare la probabilità di una scarica diretta di gravità definita. Poiché la corrente del fulmine si suddivide in diversi percorsi, la corrente di picco che si rende disponibile ad una presa di corrente alternata entro un edificio è molto inferiore alla corrente totale della scarica. L'impulso standard usato per rappresentare il fulmine e per provare i dispositivi di protezione è una forma d'onda di

corrente da 8 / 20 μs definita dalla normalizzazione ANSI C68.2-1975, ed anche dalla norma IEEE 587 - 1980.

Una terza categoria di impulsi di disturbo è quella prodotta dalla scarica dell'energia accumulata nei componenti induttivi quali i motori ed i trasformatori. Un impulso di prova definito da un'onda di corrente da 10 / 1000 μs è accettato per scopi industriali e si può considerare rappresentativo di questo tipo di disturbi.

Per quanto alle categorie di gravità dei transistori possibili non si possano ancora applicare regole fisse e semplici, si può tuttavia dare una guida molto utile per suggerire i varistori adatti alle applicazioni più comuni.

Questa guida tiene conto di fattori come il costo dell'apparecchiatura, i suoi cicli di servizio, gli effetti delle fermate per guasti, facendo un bilancio dei fattori economici derivati dal rischio di avaria all'impianto, in confronto ai costi della protezione contro i transitori.

GUIDA ALLA SCELTA DEI VARISTORI GE-MOV® PER APPLICAZIONE SU LINEE c.a. A 117 V

TIPO DI IMPIEGO	CADENZA D'IMPIEGO	ESEMPIO	TIPO SUGGERITO
Materiale di consumo leggero	molto bassa	frullatori	V130LA1
Materiale di consumo	bassa	TV portatili	V130LA10A
Materiale di consumo	media	TV normali	V130LA20A
Industriale leggero	media	fotocopiatrici	V130LA20A o B
Industriale	media	piccoli calcolatori	V130PA20A, B o C
Industriale	alta	grandi calcolatori	V130HE150
Industriale	alta	controllo ascensori	V150HE150

BIBLIOGRAFIA

1. R. Kaufman, "The Magic of I^2 t," IEEE Trans. IGA-2, No. 5 (Sept.-Oct. 1966).

CAPITOLO 5

LA SOPPRESSIONE DEI TRANSITORI NEI SISTEMI DI TELECOMUNICAZIONE

5.1 INTRODUZIONE

I moderni sistemi di telecomunicazione sono veloci, efficienti e complicati. Molti miglioramenti sono stati apportati nelle apparecchiature di centrale ed in quelle di utente equipaggiate con circuiti a stato solido. Sfortunatamente i componenti a stato solido sono molto più sensibili a malfunzionamenti o guasti dovuti a transitori di tensione ed a disturbi, dei componenti usati in passato, come i relé, le bobine, i selettori e le valvole termoioniche. Per complicare le cose, anche il sempre maggiore uso delle linee di telecomunicazione per la trasmissione di dati e segnali video ha prodotto una maggiore intolleranza alle tensioni transitorie.

Per quanto i sistemi di telecomunicazione abbiano sempre fatto uso di dispositivi di protezione dai transitori, quali il sistema a blocchetti di grafite, gli scaricatori a gas e le bobine termiche, tutti questi sistemi spesso non bastano a proteggere i circuiti allo stato solido. Il varistor GE-MOV® II promette di fornire la protezione supplementare necessaria per ottenere telecomunicazioni sempre più affidabili.

5.2 I TRANSITORI ORIGINATI NEL SISTEMA

Un sistema di telecomunicazione è composto dalle stazioni di utente collegate tra loro mediante il sistema di cavi e l'impianto di commutazione in centrale. Compresi nel sistema sono gli amplificatori ripetitori, i multiplatori ed altri circuiti elettronici. Un alimentatore principale fornisce l'energia elettrica per il funzionamento del sistema.

Il sistema di cavi e l'alimentatore sono la via per la quale i transitori dannosi entrano nel sistema, per essere trasmessi ai delicati circuiti elettronici. Il sistema di cavi consiste in conduttori schermati che corrono sospesi su pali (che condividono con le linee di energia elettrica) oppure interrati. Un singolo cavo è formato da molti conduttori disposti in coppie intrecciate (di punta e di ghiera - definizione che deriva dall'applicazione alle prese terminali a jack). Sono ancora usate alcune linee di trasmissione a filo scoperto, ma la maggioranza di queste sono molto distanti dalle centrali, ed alla congiunzione tra le linee scoperte ed i cavi schermati sono previsti di solito dei sistemi di protezione dai transitori. Tutti questi cavi (anche quelli sotterranei) sono suscettibili di captare dei transitori di energia provenienti

da scariche atmosferiche e di trasportarli fino alla centrale oppure all'apparecchio di utente.

La corrente di alimentazione di un sistema di telecomunicazioni è prelevata di solito dalle linee di distribuzione commerciali. Queste linee, come accade ai cavi telefonici, sono sia su palo che interrate. Le linee di distribuzione elettrica captano

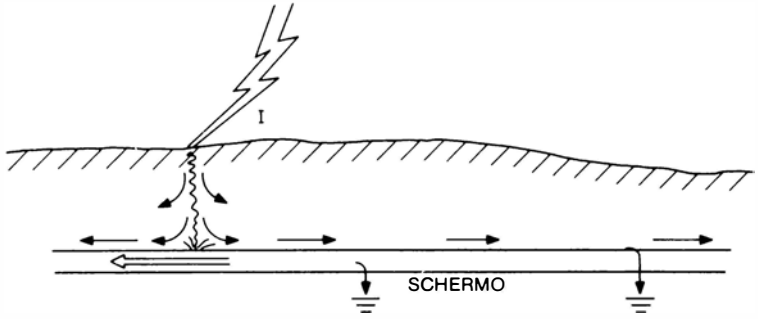


Figura 5.1 - Correnti originate dal fulmine in un cavo interrato.

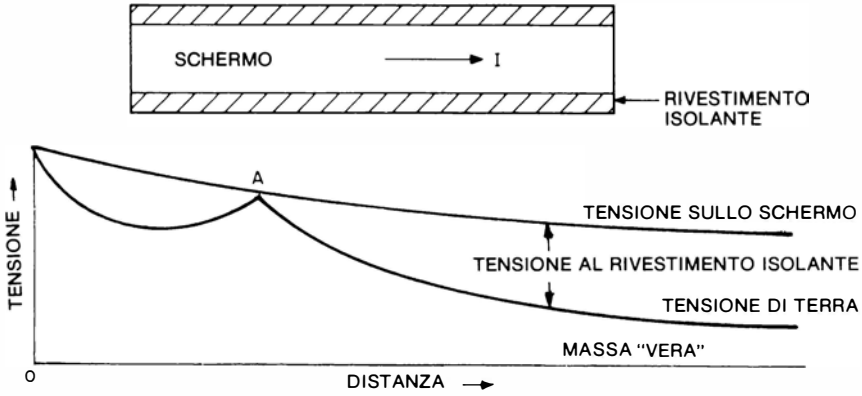


Figura 5.2 - Condizioni di perforazione del rivestimento del cavo.

molto spesso dei transitori di energia, che vengono trasmessi alle centrali per conduzione diretta o per induzione sui cavi telefonici. L'uso sempre più frequente dell'alimentazione fuori - linea (off-line) nelle apparecchiature telefoniche rende i transistori sull'alimentazione sempre più pericolosi per i circuiti elettronici.

5.3 LE SCARICHE ELETTRICHE ATMOSFERICHE - TRANSITORI INDOTTI

I fulmini sono l'origine più comune delle sovratensioni nei sistemi di comunicazione. A causa dell'esposizione di questi impianti agli effetti del fulmine, è impor-

tante conoscere le loro conseguenze quando si progetta un sistema di protezione ai transitori.

Le correnti originate dalle scariche atmosferiche possono entrare nello schermo conduttore di un cavo sospeso per impatto diretto od indiretto, oppure possono penetrare in un cavo interrato mediante le correnti di terra, come si vede in Figura 5.1.

Nel caso di cavi sospesi la corrente originata dal fulmine che penetra in essi cerca di scaricarsi a terra e viaggia in entrambe le direzioni lungo il cavo. Parte della corrente lascerà lo schermo ad ogni palo messo a terra che incontrerà. Degli studi hanno dimostrato che tutta la corrente del fulmine lascia lo schermo del cavo dopo aver toccato dieci pali messi a terra in terreni ad alta conduttività, oppure venti pali messi a terra in suoli ad alta resistività.

Le correnti originate dalla scarica abbandonano un cavo interrato in maniera simile ma con un diverso meccanismo. Dato che lo schermo del cavo ha una resistenza elettrica finita, la corrente che vi passa produce un gradiente di potenziale nel verso della sua lunghezza. Questa tensione produrrà una differenza di potenziale tra il cavo ed il suolo, come si vede in Figura 5.2.

Ad un certo punto (Punto A) il potenziale tra schermo e terra supererà la rigidità dielettrica del rivestimento provocandone la perforazione. Buona parte della corrente del fulmine passa attraverso questa perforazione verso il terreno equalizzando il potenziale in questo punto. Il resto della corrente continua a viaggiare lungo lo schermo finché avviene un'altra perforazione e conseguente passaggio verso terra.

Di solito le correnti dovute al fulmine non sono dannose per la schermatura ma inducono delle tensioni transitorie nei conduttori del cavo che risultano spesso pericolose per le apparecchiature di centrale. La tensione impulsiva che appare ai terminali del cavo dipende dalla distanza rispetto alla perturbazione, dal tipo di cavo, dal materiale di schermatura e dallo spessore ed isolamento, come pure dall'ampiezza e dalla forma d'onda della corrente originata dal fulmine nella schermatura. Dato che il potenziale lungo il cavo originato da questa corrente è accoppiato capacitivamente ai conduttori del cavo, la forma d'onda della tensione di transitorio nei conduttori somiglierà in modo quasi perfetto alla forma d'onda della corrente dovuta al fulmine.

Un'informazione quantitativa sul comportamento del fulmine è stata accumulata via via in molti testi[2] mentre vi sono centri di ricerche negli Stati Uniti, Europa Occidentale e Sud Africa. Una delle più complete rassegne di dati disponibili è stata compilata da Cianos e Pierce[3], con descrizioni dell'ampiezza, del tasso di aumento, della durata, eccetera, in forma statistica.

Usando queste statistiche si possono effettuare dei calcoli numerici sulla tensione indotta in diversi circuiti elettrici tra i quali il sistema di cavi di un impianto di comunicazioni. I parametri che interessano sono le tensioni sviluppate in funzione

dell'intensità e della durata di un impulso da fulmine. Gli esempi che presenteremo in seguito in questo capitolo sono basati su informazioni tratte da questo testo.

5.4 CALCOLO DEI TRANSITORI SUI CAVI

Il picco di tensione indotto nei conduttori di un cavo si propagherà come un'onda progressiva in entrambe le direzioni a partire dalla zona di induzione. Il cavo agisce come una linea di trasmissione. La corrente di impulso e la tensione sono in relazione tra loro secondo la legge di Ohm nella quale il rapporto tra la tensione e la corrente è l'impedenza di transitorio (Z_o del cavo. Z_o può anche essere espressa usando l'induttanza (L) e la capacità (C) per unità di lunghezza del cavo secondo la seguente equazione:

$$Z_o = \sqrt{L/C}\ (\Omega)$$

La velocità dell'impulso che si propaga lungo i conduttori è anch'essa una funzione di L e di C e può essere espressa da:

$$\text{Velocità} = \sqrt{1/LC}\ (\text{m/s})$$

La resistenza opposta dallo schermo e dai conduttori, nonché le perdite dovute all'effetto corona ed agli archi determinano la perdita di energia nella propagazione del disturbo lungo il cavo.

Prove effettuate su cavi telefonici[4] hanno misurato delle impedenze di transitorio di 80 Ω tra uno qualunque dei conduttori e lo schermo. Sono state misurate resistenze dello schermo tipiche di 5 Ω e di 6 Ω per miglio. Questi valori e la forma d'onda originata dal fulmine di Figura 5.3 furono usati per calcolare il transitorio nel caso più sfortunato, che avrebbe potuto apparire ai terminali del cavo nella centrale. Il calcolo presuppone che la corrente da fulmine sia introdotta nello schermo di un cavo sospeso in un punto che dista 2,75 miglia (4,5 km) dalla centrale. È stato preso in considerazione un cavo medio con distanza tra i pali di 165 piedi (~ 50 m), con una connessione a terra ogni quattro pali. Si è anche presupposto che il cavo possa sopportare la tensione senza che si generino archi.

In figura 5.4 si vede la corrente di cortocircuito risultante che si renderà disponibile in centrale.

La tensione a circuito aperto al terminale del cavo si vede in Figura 5.5. Questa analisi dimostra che se un colpo di fulmine di tipo grave da 100 kA colpisce un cavo in un punto distante 2,75 miglia (~ 4,5 km) dalla centrale, al terminale del cavo apparirà un transitorio di tensione che raggiunge un picco di circa 18 kV con una corrente disponibile di circa 355 A.

Dato che il cavo può essere considerato un sistema lineare, le tensioni e le correnti saranno in relazione lineare con l'ampiezza del colpo di fulmine. In Tabella 5 si vede un tabulato delle tensioni a circuito aperto e delle correnti disponibili che risulteranno da correnti di scarica atmosferica di varie ampiezze. Nella tabella è compresa

la probabilità dell'evento secondo Cianos e Pierce[3]. Si deve ritenere che tensioni superiori ai 10 kV probabilmente non verrebbero sopportate dall'isolamento del cavo.

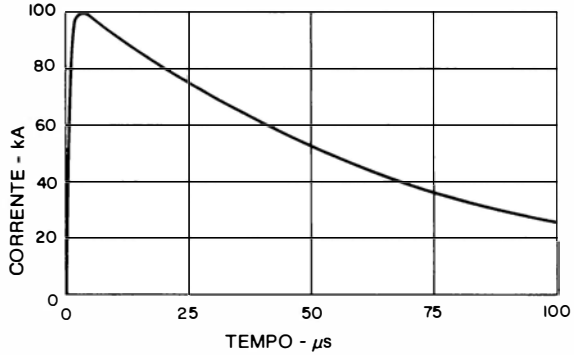


Figura 5.3 - Forma d'onda della corrente dovuta ad una scarica atmosferica di tipo grave (2 x 50 μs).

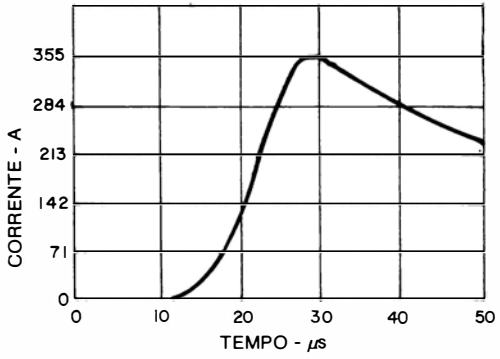


Figura 5.4 - Corrente disponibile a 2,75 miglia (4,4 km) di distanza da un colpo di fulmine da 100 kA.

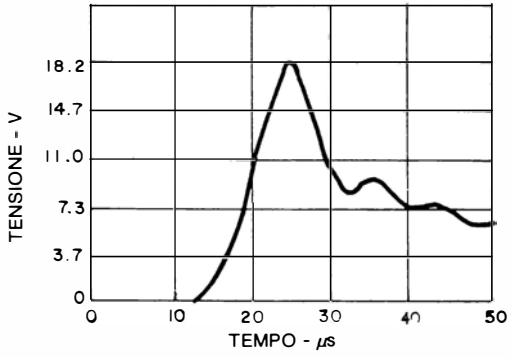


Figura 5.5 - Tensione a circuito aperto ad una distanza di 2,75 miglia (4,4 km) da un colpo di fulmine da 100 kA.

La tensione transitoria in centrale sarebbe in ogni caso eccessiva per cui occorrono dei sistemi di protezione. Il protettore dovrebbe condurre fino a 213 A di

TABELLA 5.1.
TRANSITORI DI SCARICA ATMOSFERICA AL TERMINALE DEL CAVO DISTANTE 2,75 MIGLIA DAL PUNTO D'IMPATTO

Corrente di picco del colpo di fulmine	Probabilità dell'evento	Tensione a circuito aperto al terminale del cavo	Corrente di cortocircuito al terminale del cavo
KA	%	V picco	A picco
175	1	32.200	621
100	5	18.400	355
60	15	11.040	213
20	50	3.680	71

corrente di picco per la maggior parte (85%) delle scariche possibili e soltanto fino al doppio di tale corrente in rare occasioni.

I valori di Tabella 5.1 sono basati sul presupposto di un cavo a conduttore singolo con punto di impatto del fulmine a 2,75 miglia dalla centrale. Per impatti più vicini la corrente di cortocircuito di picco al terminale del cavo aumenterà come mostrato in Tabella 5.2. Questi calcoli sono stati fatti presupponendo una scarica distruttiva nel punto di impatto, e quindi si tratta di risultati riferiti al caso più sfortunato.

Dato che i cavi telefonici hanno in effetti molte coppie di fili invece di un unico conduttore, le correnti di picco in ciascun filo avranno un valore più basso. È stato supposto che la tensione proveniente dal fulmine si induce in modo uniforme in tutti i fili se essi hanno un uguale carico. Quindi, se tutti i protettori sono identici, le correnti in tutti i fili saranno uguali tra di loro. Per prevedere le correnti nei singoli

TABELLA 5.2
CORRENTI DI PICCO INDOTTE DAL FULMINE IN LUNGHEZZE DIVERSE DI CAVO TELEFONICO (SCARICA ATMOSFERICA DA 100 KA)

Distanza dal punto d'impatto miglia km	CORRENTI DI PICCO (A)			
	AL PUNTO D'IMPATTO	IN CENTRALE		
		conduttore singolo	cavo a 6 coppie	cavo a 12 coppie
2,75	630	355	—	—
1,50	630	637	—	—
1.00	734	799	—	—
0,5	1110	1120	712	453
0,25	1480	1480	852	463

fili si suppone che le correnti di filo siano proporzionali alla corrente nella guaina ed al rapporto delle resistenze, e che vengano ridotte ad un livello costante dell'induttanza del cavo. In Tabella 5.2 si vedono i valori calcolati per le minime distanze e per il caso peggiore.

Si può ora valutare un esempio della corrente che dovrà sopportare un dispositivo di protezione. Supponiamo di avere un cavo con sei coppie (il più piccolo disponibile) e che questo sia colpito dal fulmine, che induce nello schermo una corrente di transitorio di 100 kA ad una distanza di 0,25 miglia (0,4 km) dalla protezione. La corrente di transitorio verrà suddivisa tra i dodici soppressori che si trovano al terminale del cavo. Ogni dispositivo di protezione avrà a che fare con una corrente che arriva ad 852 A di picco e dovrà limitare la tensione ad un livello di sicurezza.

5.5 I SISTEMI DI POTENZA - TRANSITORI INDOTTI

Dato che i cavi telefonici dividono spesso un palo ed un filo di terra con il sistema di distribuzione elettrica commerciale, le alte correnti che accompagnano i guasti nei sistemi di potenza possono indurre delle sovratensioni nei cavi telefonici. Questi picchi di tensione indotta avranno la frequenza della rete elettrica di distribuzione e potranno avere una lunga durata (se confrontata a quella dei transitori indotti dai fulmini), che va da alcuni millisecondi ad alcuni cicli della frequenza di rete. In congiunzione con i guasti nel sistema di distribuzione, si possono avere tre tipi di sovratensione:

Contatto tra le linee — Quando una linea elettrica cade e va in contatto con il cavo telefonico.

Induzione da parte della linea elettrica — Quando l'accoppiamento elettromagnetico tra l'impianto di distribuzione elettrica che ha un guasto grave e la linea telefonica produce una sovratensione nel cavo telefonico.

Aumento del potenziale di terra — Quando le forti correnti dovute a guasti nel sistema di potenza passano attraverso i collegamenti comuni di terra e provocano apprezzabili differenze di potenziale.

Ci sono a disposizione pochi dati definitivi riguardanti la gravità di queste sovratensioni. I tecnici addetti allo studio dei sistemi di protezione telefonici hanno fatto però delle proposte nel senso di arrivare a definire il contatto tra le linee il caso più grave. La norma proposta chiede al soppressore di sopportare 10 A eff. per una durata del contatto che varia da 10 a 60 cicli della frequenza della rete elettrica.

5.6 SISTEMI DI PROTEZIONE: I SOPPRESSORI DEI TRANSITORI DI TENSIONE

5.6.1 Protezione primaria

Il protettore primario più antico e più comunemente usato per un sistema telefonico è lo spinterometro a blocchetti di grafite. Questo dispositivo è composto

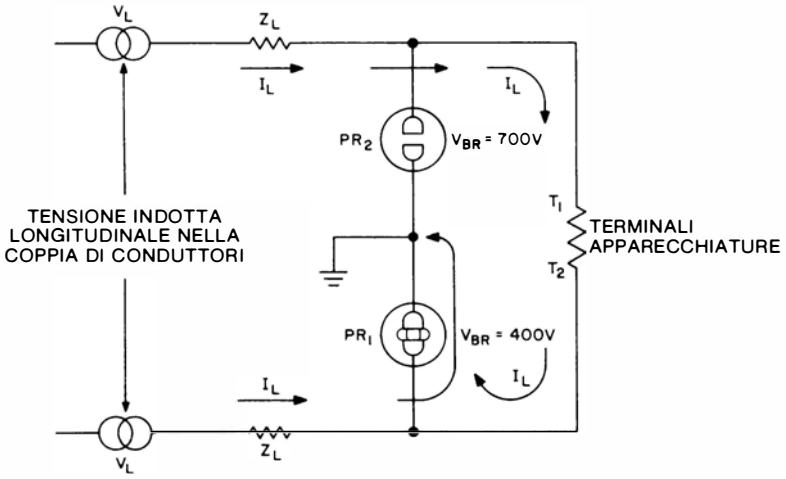


Figura 5.6 - Protezione sbilanciata della linea.

da due elettrodi a blocchi di grafite separati da un piccolo intervallo d'aria che va da 8 a 10 decimi di millimetro. Uno degli elettrodi è collegato al conduttore del cavo telefonico e l'altro alla terra del sistema. Quando si verifica un transitorio di tensione, avviene una scarica attraverso la fessura, che devia il transitorio e ne dissipa l'energia nell'arco e nell'impedenza del generatore del transitorio. Lo scaricatore a grafite è una protezione a basso costo ma ha una vita relativamente breve, e dimostra di subire variazioni della tensione d'arco. Il valore statistico della tensione d'arco negli scaricatori normali da 0,8 mm (tre millesimi di pollice) varia da 300 V a 1000 V, e questo è un problema molto serio.

I conduttori telefonici sono disposti a coppie nel cavo, e così le tensioni di transitorio indotte nei conduttori saranno comuni ad entrambi i conduttori della coppia, come si vede in Figura 5.6. Questa tensione longitudinale non produce una corrente ai terminali del carico. Tra i conduttori c'é di norma una differenza di potenziale zero. Se il protettore PR1 dovesse intervenire a 400 V, mentre PR2 ne richiede 700, per un transitorio di 600 V si avrebbe l'intervento del solo PR1: in questo caso si avrebbe il passaggio di una corrente di transitorio attraverso il carico. Anche se PR2 dovesse a sua volta intervenire, ma in ritardo rispetto a PR1, si avrebbe una corrente di transitorio.

Un altro tipo molto comune di protezione per gli impianti telefonici è lo scaricatore a gas. Esso è formato da due spinterometri metallici distanziati tra di loro di 25 ÷ 38 decimi di millimetro. Gli elettrodi sono contenuti in un involucro di vetro sigillato che contiene una miscela di gas a bassa pressione. Questi scaricatori possono sopportare una corrente più elevata ed hanno una durata maggiore dei dispositivi a blocchi di grafite. Però la possibilità di perdite nella sigillatura e la conseguente diminuzione della protezione hanno limitato l'uso di questo componente. I tubi a gas *a doppia fessura*, detti anche tubi a gas a tre elettrodi, sono stati proposti per alleviare il problema della scarica sbilanciata descritta nel capoverso precedente.

I varistori GE-MOV® II possiedono delle proprietà che li rendono degli eccellenti candidati alla protezione dei sistemi telefonici. Queste caratteristiche comprendono tolleranze molto ristrette, elevata affidabilità, alta dissipazione di energia, e buone caratteristiche di limitazione di tensione. Il varistor GE-MOV® II tipo V130LA20A, per esempio, ha la possibilità di gestire transitori con correnti di picco di 6000 A (impulsi da 8 / 20 μs) e di dissipare fino a 50 J di energia. Il picco di corrente di 6000 A produrrà ai capi del varistor una tensione limitata ad un massimo di 600 V. Un impulso da 1000 A verrà limitato a meno di 420 V, mentre i picchi della tensione di suoneria, dal valore di 180 V non subiranno l'influenza di questo varistor.

5.6.2 Protezione secondaria

I moderni circuiti per comunicazioni allo stato solido possono essere danneggiati anche se la protezione primaria funziona normalmente. Spesso è consigliabile prevedere un sistema di protezione secondario allo scopo di ridurre ulteriormente il transitorio di tensione. Come dimostrato in figura 5.7, la protezione secondaria rimuove i picchi di tensione che passano indenni attraverso la protezione primaria.

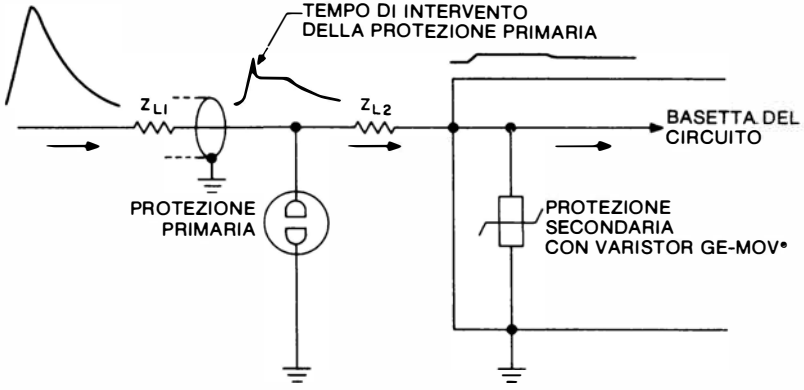


Figura 5.7 - Protezione secondaria.

Nella maggior parte delle installazioni la lunghezza del conduttore tra la protezione primaria e le basette del telefono è maggiore di 7 - 8 metri. L'impedenza (Z_{L2}) presentata da questa lunghezza di filo alla maggior parte dei transitori di tensione di origine atmosferica garantirà che la protezione primaria interverrà per prima, e che la protezione secondaria non sarà esposta all'impulso totale. Nei rari casi in cui avviene uno *scavalcamento di potenza*, il varistor potrà cedere, ma svolgerà comunque il suo compito di proteggere la basetta. Dato che il varistor va fuori servizio instaurando un corto circuito, esso provocherà la bruciatura dei fusibili del sistema. Di norma la probabilità di uno *scavalcamento di potenza* è talmente bassa che la sostituzione di un varistor guasto è un'alternativa accettabile rispetto alla riparazione di una basetta danneggiata.

5.7.1 I TRANSITORI DOVUTI ALLE LINEE DI ALIMENTAZIONE

Il varistor GE-MOV® II è un ottimo soppressore dei transitori introdotti in un sistema di telecomunicazioni attraverso le linee di alimentazione. Il varistor, se scelto oculatamente, non avrà influenza sul funzionamento normale della linea, ma limiterà i pesanti picchi transitori ad un livello di tensione accettabile. Per informazioni sulla scelta di un soppressore a varistor si faccia riferimento ai Capitoli 2 e 4.

5.8 LA PROTEZIONE DEI CONTATTI DEI RELÈ

Anche i più moderni impianti telefonici necessitano dell'impiego di relé e di altri sistemi di commutazione meccanica. Questi dispositivi occorrono per commutare correnti in carichi induttivi, che provocano archi ai contatti, puntinatura e disturbi elettromagnetici. Il varistor GE-MOV® II è un comodo soppressore atto a prolungare la vita dei contatti, a migliorarne l'affidabilità ed a ridurre i disturbi. I Capitoli 1 e 4 contengono le informazioni riguardanti la protezione dei contatti mediante i varistori.

BIBLIOGRAFIA

1 E. Bennison, P. Ferland and A.J. Ghazi, "Lightning Surges in Open-Wire, Coaxial and Paired Cables," IEEE International Conference on Communications, June 1972.

2 R.H. Golde, "Lightning Currents and Related Parameteres," Lightning, Vol. 1, Physics of Lightning, Chapter 9, R.H. Golde Ed., Academic Press, 1977.

3 N. Cianos and E.T. Pierce, "A Ground Lightning Environment for Engineering Usage," Report No. 1 August 1972, Stanford Research Institute.

4 C.F. Boyce, "Protection of Telecommunication Systems," Lightning, Vol. 2, Lightning Protection, Chapter 25, R.H. Golde Ed., Academic Press, 1977.

CAPITOLO 6

LA SOPPRESSIONE DEI TRANSITORI SUGLI AUTOVEICOLI

6.1 TRANSITORI DOVUTI ALL'AMBIENTE

Il progettista di circuiti elettronici per impiego automobilistico deve assicurare il funzionamento privo di inconvenienti del circuito in un ambiente che presenta dei transitori di carattere pesante. I transitori presenti nell'alimentazione che provengono dall'impianto dell'automobile vanno da un grado di notevole gravità, con elevata energia, come quelli generati dal sistema alternatore-regolatore, ai "distur-

Durata del transitorio	Causa	Contenuto energ. / ampiezza della tensione	Probabile frequenza dell'evento
Permanente	regolatore di tensione guasto	∞ / + 18 V	non frequente
5 minuti	Avviamento a freddo con batteria a 24 V	∞ / ± 24V	non frequente
4,5 ms÷0,1s	Caduta del carico, ossia scollegamento della batteria durante la carica a regime elevato	⩾ 10 J / ⩽ 125 V	non frequente
⩽ 0,32 s	Transistori di interruzioni carichi induttivi	< 1 J / da −300V a +80V	frequente
⩽ 0,20 s	Caduta del campo dell'alternatore	< 1 J / da −100V a −40V	ad ogni distacco
90 ms	Impulso di accensione a batteria scollegata	< 0,5 J / ⩽ 75V	⩽ 500 Hz molte volte nella vita del veicolo
1 ms	Accoppiamenti mutui nel cablaggio*	< 1 J / ⩽ 200V	frequente
15 μs	Impulsi di accensione normali	< 0,001 J / 3V	⩽ 500 Hz, continuato
	Disturbi supplementari	⩽ 1,5 V	da 50Hz a 10 kHz
	Induzione da parte di un ricetrasmettitore	≈ 20 mV	Radiofrequenza

* Questi transistori possono essere presenti in ogni filo del veicolo

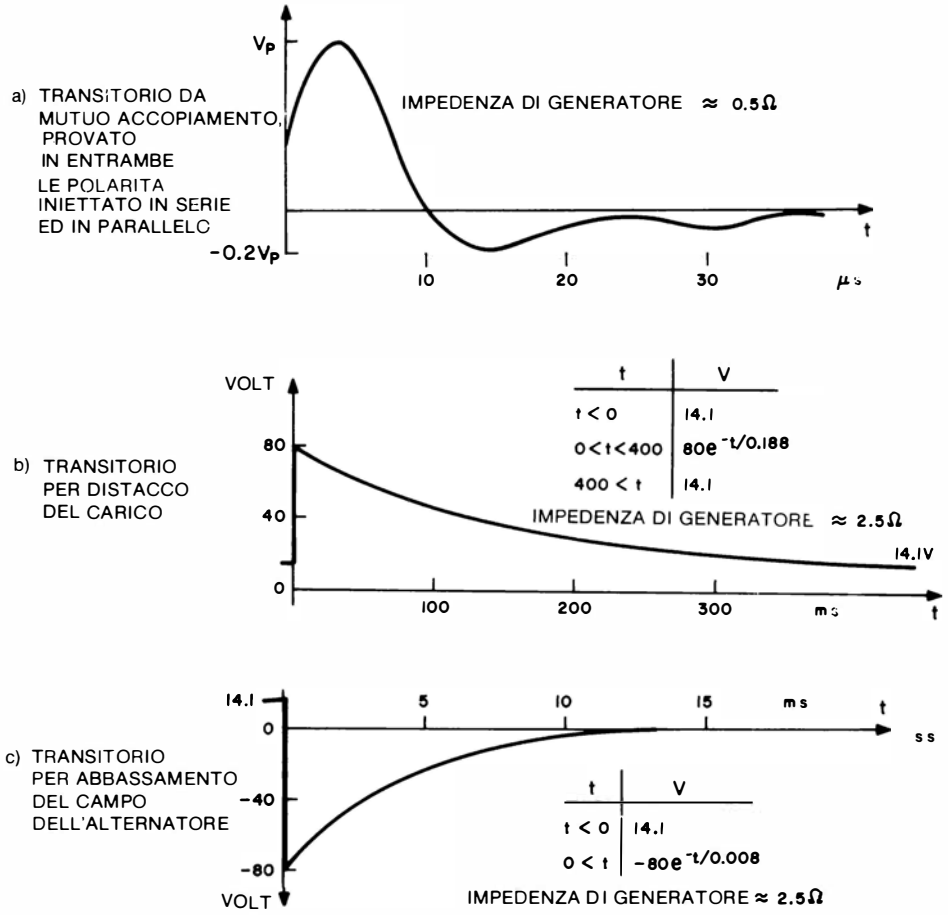
Figura 6.1 - Sommario dei tipici fenomeni transitori nel circuito elettrico degli autoveicoli.

bi" a basso livello che traggono la loro origine nel sistema di accensione e nei diversi accessori (motori, apparecchi radio, ricetrasmettitori eccetera). I transitori sono accoppiati ai terminali d'ingresso e di uscita delle apparecchiature elettroniche dell'auto anche per induzione magnetica o capacitativa nel cablaggio, come pure per accoppiamento conduttivo nei circuiti che hanno un conduttore in comune (in particolare la "massa" al telaio). Delle sovratensioni a regime permanente possono arrivare tramite l'alimentatore del circuito a causa di un guasto al regolatore di tensione oppure all'uso di una batteria a 24 V per gli avviamenti d'emergenza. I circuti devono essere progettati tenendo anche conto del fatto che una batteria potrà essere collegata a polarità invertita. I circuiti che pilotano carichi induttivi devono essere protetti contro i transitori che hanno origine dall'energia accumulata nel campo magnetico dell'induttore. Questi transitori possono essere definiti ricorrendo all'induttanza ed alla corrente del carico. La Figura 6.1 riassume i transitori presenti nell'alimentazione di un impianto automobilistico, come risulta dai documenti[1] della SAE (Society of Automative Engineers = Società degli ingegneri automobilistici).

L'ottimizzazione della protezione contro i transitori coinvolge parecchi fattori. Si devono determinare per prima cosa le conseguenze di un guasto. Si devono prendere in considerazione le impedenze di limitazione della corrente ed i requisiti necessari di immunità ai disturbi. Altri fattori sono lo stato del circuito durante il transitorio (acceso, spento, ignoto) e la disponibilità di componenti a basso costo che abbiano la capacità di opporsi ai transitori. Tra i dati raccolti sui transitori negli autoveicoli sono state riscontrate notevoli variazioni. Richiede inoltre una definizione l'interazione tra le altre parti dell'impianto elettrico dell'automobile ed i circuiti che risentono delle condizioni di transitorio. In molti casi non è valida la valutazione empirica della soppressione dei transitori in base ai circuiti di prova raccomandati dalla SAE[2]. La Figura 6.2 illustra le forme d'onda di prova per i transitori ad alta energia più comuni.

6.2 APPLICAZIONI DEI VARISTORI

Si faranno due esempi per chiarire le procedure connesse al progetto delle protezioni contro i transitori nell'elettronica per impiego automobilistico. Uno di questi esempi illustra la protezione di un circuito di azionamento per solenoide consistente in un circuito integrato digitale con transistor di potenza in uscita; il secondo esempio tratta della protezione del transistor di uscita di un circuito di accensione. Questi esempi dimostrano anche la differenza tra la protezione contro i transitori casuali e quella controlo i transitori ripetitivi. Nel caso dei transitori casuali, l'energia e la tensione di limitazione in confronto alla dissipazione di potenza in regime normale sono i requisiti dominati. Per i transitori ripetitivi, un requisito supplementare nella scelta del dispositivo di soppressione viene posto dalla dissipazione della potenza del transitorio. Il circuito di protezione dell'azionatore del solenoide evidenzia anche la situazione di conflitto che si verifica nella soppressione dei transitori sull'automobile a causa delle basse prestazioni in tensio-



Nota: Ampiezza, impedenza e costanti di tempo variano a seconda del particolare sistema elettrico considerato e del carico ad esso applicato.

Figura 6.2 - Forme d'onda di prova per transitori di tipo grave (procedure di prova proposte dalla SAE[2]).

ne massima dei circuiti integrati, dei cicli di avviamento di emergenza a 24 V e dei transitori dovuti al distacco del carico.

6.2.1 Protezione mediante soppressore centrale

Un soppressore centrale forma il principale dispositivo di soppressione dei transitori in un veicolo a motore. Questo dispositivo è direttamente collegato tra i cavi principali di alimentazione, senza che ci sia presente alcuna resistenza di carico. Esso dovrà assorbire tutta l'energia dovuta al distacco del carico e resistere

alla tensione totale usata per gli avviamenti d'emergenza. Per poter essere economico, esso viene di solito collocato in protezione del modulo elettronico più critico. In altre posizioni potranno essere montati altri soppressori per un effetto migliore oppure per controllare sorgenti locali di disturbi.

L'energia che si presenta al soppressore centrale in caso di distacco del carico dipende, nel peggiore dei casi, da variabili quali le dimensioni dell'alternatore, la risposta del sistema di regolazione ai dati rilevati ed i diversi carichi tra i quali vengono suddivise la corrente e l'energia del transitorio. Ogni applicazione tende perciò ad essere diversa dalle altre. Combinando però diverse applicazioni è possibile costruire un esempio dimostrativo. Il fatto principale è la valutazione della potenza transitoria proveniente dall'alternatore, che dovrà essere dissipata nel soppressore. Come punto di partenza per l'analisi si suggerisce la figura 6.3. Dato che risulta disponibile una potenza impulsiva di picco di 1600 W, un soppressore con tensione di limitazione di 40 V dovrà passare una corrente di picco di 40 A. L'energia di picco occorrente al soppressore si potrà trovare integrando la potenza del transitorio rispetto al tempo, e si avrà come risultato circa 85 joule. Occorre anche considerare una tensione di 24 V in caso di avviamento d'emergenza.

Il calcolo dei dispositivi di soppressione centrale potrà essere facilitato con l'aiuto di un simulatore di distatto del tipo mostrato in figura 6.4. L'induttore L, che simula l'induttanza dell'alternatore, aumenta il tempo di salita del picco, ma non influenza materialmente l'analisi. Se mancano il soppressore od il carico, la forma d'onda d'uscita sarà analoga a quella di figura 6.2b. In presenza del soppressore, le caratteristiche funzionali possono essere trovate come segue:

Si ritenga che $V_C = 40$ V, avremo $I_P = (80–40\ V) / R_1 = 40$ A

L'energia W dissipata nel varistor potrà essere valutata mediante $W = 1{,}4\ V_C\ I_{Pt}$ (vedi paragrafo 4.1.2). La durata d'impulso tau della corrente impulsiva (vedi figura 3.21), si potrà prevedere dal tempo di ritardo:

$$\tau = 0{,}7\ RC_1$$

dove R è la combinazione serie-parallelo della resistenza efficace del varistor e dei componenti R_1 ed R_2 del simulatore. Per facilitare il calcolo, si ritenga che la resistenza efficace si calcoli mediante la $V_C/0{,}7\ I_P = 1{,}4$ ohm. La costante di tempo del ritardo che si avrà con il soppressore in ciruito, diverrà quindi:

$$RC_1 = [(2{,}4 \times 7)/(2{,}4 + 7)]\ (0{,}03) = 0{,}054 \text{ secondi}$$

e la durata dell'impulso transitorio sarà:

$$\tau = 0{,}7\ RC_1 = 0{,}038 \text{ secondi}$$

si potrà ora valutare l'energia dissipata medianta la:

$$W = 1{,}4\ V_C\ I_P\ \tau = (1{,}4)(40)(40)(0{,}038) = 85 \text{ joule}$$

Di conseguenza il simulatore pruduce le condizioni di circuito protetto e non protetto analoghe a quelle che ci si attendono nel veicolo vero e proprio .

È stato messo a punto ed è già in uso un soppressore con le adatte caratteristiche di elevata dispersione energetica. Questo modello di varistor GE-MOV® II miglio-

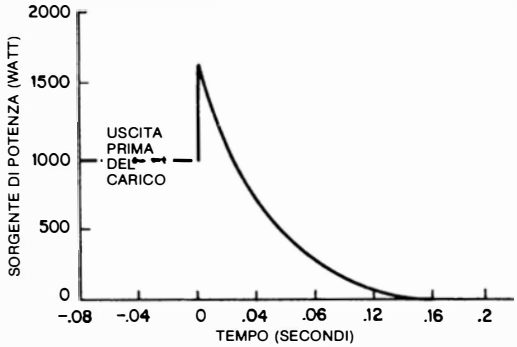


Fig. 6.3 - Potenza di uscita dell'alternatore verso il soppressore centrale.

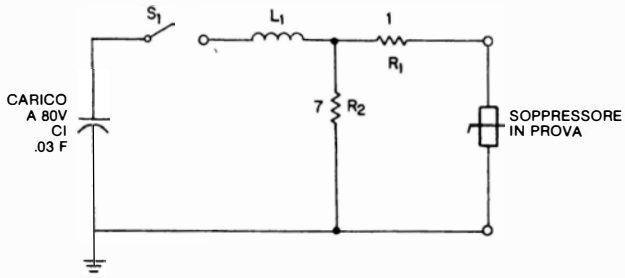


Fig. 6.4 - Circuito simulatore del distacco del carico.

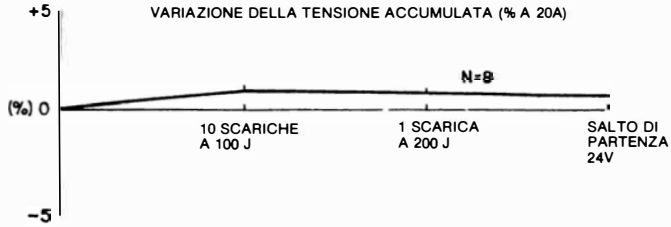


Fig. 6.5 - Stabilità della tensione di limitazione.

rato, tipo V24ZA50 ha un tasso di assorbimento per distacco del carico di 100 joule. La scelta di un tipo a bassa tolleranza potrà soddisfare i requisiti di limitazione a 40V massimi, con una corrente di 40 A, in grado di sopportare l'avviamento di

emergenza a 24 V. Le prestazioni in protezione di questo soppressore possono essere misurate in modo conveniente usando il circuito simulatore di figura 6.4.

La durata del soppressore è stata verificata sottoponendo per prima cosa dei campioni alle condizioni di mancanza di carico della durata di 30 s (un numero totale di 10 prove). Dopo le necessarie misure, sono state applicate altre sollecita-

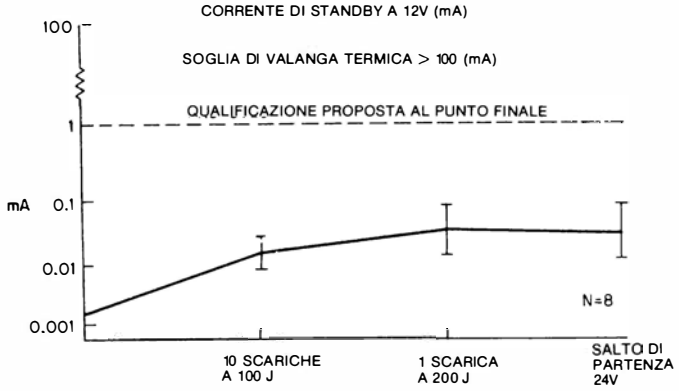


Fig. 6.6 - Stabilità della corrente a riposo.

zioni consistenti in una singola caduta del carico da 200 J ed in una surtensione per avviamento d'emergenza di 24 V per 5 minuti. La tensione di limitazione, che praticamente non varia con la temperatura, si è dimostrata pressoché costante aumentando la sollecitazione fino al livello distruttivo di circa 250 J (vedi figura 6.5). La corrente a riposo, che è il parametro più sensibile, resta ben addentro i limiti, come si può osservare nella figura 6.6.

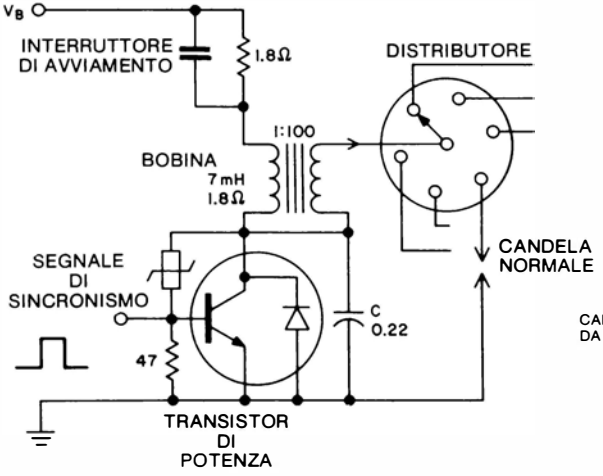
6.2.2 Protezione di un'accensione elettronica

Nel secondo esempio viene analizzata la protezione del transistor di potenza di uscita in un circuito di accensione elettronica. Questo transistor di potenza esegue la funzione di commutatore delle puntine platinate dello spinterogeno di una normale accensione Kettering, evitando di conseguenza i fenomeni di puntinatura, bruciatura ed erosione comuni nei contatti meccanici. Il circuito di accensione è illustrato in Figura 6.7.

Nel funzionamento normale la corrente nella bobina del primario aumenta quando il transistor è in conduzione, accumulando energia nell'induttanza. Il transistor di potenza viene quindi commutato all'interdizione e la tensione al collettore cresce rapidamente mentre il condensatore C si carica. L'azione del trasformatore provoca un aumento della tensione secondaria fino a raggiungere il valore di scarica tra gli elettrodi della candela interrompendo in questo modo la

salita della tensione del collettore ad un valore di sucurezza. Se una candela è sporca o scollegata, la tensione di collettore potrà salire fino a che l'intera energia accumulata, meno le perdite, passi nel condensatore o finché il transistor passi in conduzione inversa con relativo danneggiamento/guasto. Dato che il condensatore è piccolo, il trasferimento dell'energia immagazzinata dalla bobina verso il condensatore darà origine ad una tensione molto alta che richiede una protezione per il transistor. Per far passare il transistor in conduzione durante il periodo di alta tensione si potrà usare un varistor dissipando in tal modo, con sicurezza, l'energia eccessiva in calore. I dati per la scelta del varistor sono: la tensione di limitazione deve essere sufficientemente bassa da proteggere il transistor; la tensione di limitazione deve essere sufficientemente alta da non limitare la normale energia della scintilla; la dissipazione di potenza (con due candele scollegate) deve rimanere entro i valori nominali del varistor per un motore ad 8 cilindri, 4 tempi a 3300 giri al minuto (media delle false accensioni 55 Hz). La tensione minima prescritta all'uscita verso la candela è di 20.000 V che corrispondono a 200 V al collettore del transistor. Il transistor resiste ad una tensione inversa nominale di 400 V, con la resistenza base-emettitore da 47 Ω ed un guadagno di corrente maggiore di 20. La tensione base-emettitore in stato di conduzione ($V_{BE(ON)}$) ha un valore compreso tra 1 ed 1,8 V, e la tensione di saturazione tra collettore ed emettitore sta tra 0,9 ed 1,5 V. La tensione di limitazione del varistor avrà un campo di variazione determinato dai 200 V necessari per fornire la tensione minima alla candela e la limitazione a 400 V per il transistor. A 200 V la corrente del varistor deve essere inferiore a:

$$V_{BE(ON)}/47\ \Omega = \frac{1\ V}{47\ \Omega} = 0{,}02\ A$$



CONDIZIONI DEL SISTEMA		
CONDIZIONE	V_B	COMM. DI AVV.
IN MOTO	12V TO 16V	APERTO
AVVIAMENTO	5V TO 12V	CHIUSO

CAMPO DI TEMPERATURE DI FUNZIONAMENTO DA −40 °C A +110 °C

Figura 6.7 - Esempio 2. Tipico circuito di accensione elettronica.

per evitare un passaggio in conduzione indesiderato del transistor. La tensione minima del varistor nel punto particolare ad 1 mA viene trovata risolvendo l'equazione della tensione del varistor:

$$I = k\,V^{\alpha}$$

ponendo per α un limite massimo di 40. Il risultato è 186 V. La corrente di limitazione dei picchi (a 400 V - $V_{BE(MAX)}$) si ricava dall'equazione del bilancio energetico della bobina, usando la corrente di picco nella bobina I_C. I_C massima viene analizzata alle condizioni di avviamento e di marcia normale, allo scopo di determinare il caso peggiore:

$$I_{C(avv.)} \leqslant \frac{12 - 0{,}9}{1{,}8} = 6{,}17 \text{ A}$$

e:

$$I_{C(marcia)} \leqslant \frac{16 - 0{,}9}{3{,}6} = 4{,}2 \text{ A}$$

La corrente di bobina del caso peggiore si ha con il contatto di avviamento chiuso e sarà inferiore a 6,2 A. La corrente massima di picco nella bobina (I_P) alla limitazione, sarà quindi:

$$\tfrac{1}{2} L\, I_c^2 = \tfrac{1}{2} L\, I_p^2 + \tfrac{1}{2} C\, V_p^2$$

e, con una V_P di 400 V:

$$I_p^2 = I_c^2 - 400^2\, C/L$$

il risultato è di 6,0 A all'avviamento e di 3,6 A in marcia. Le correnti nel varistor che corrispondono a queste, sono:

$$I_p/h_{FE} + V_{BE}/47\ \Omega;$$

da cui si ottengono i valori di 0,34 A per l'avviamento e di 0,22 A in marcia. La tensione di picco del varistor deve essere inferiore a:

$$400 \text{ V} - V_{BE} \text{ (ossia 398 V a 0,34 A)}$$

La dissipazione di potenza del varistor a 3300 giri al minuto (55 periodi al secondo),

ritenendo che la forma d'onda della corrente sia triangolare con tensione costante e senza perdite, si trova ricorrendo al bilancio energetico della bobina:

$$\frac{1}{2} L (I_P)^2 = V_{MAX} \frac{I_P}{2} t \qquad \frac{1}{2} L (I_P)^2 = V_{MAX} \frac{I_P}{2} t$$

risolvendo per t:

$$t = \frac{(7)(10^{-3})H(3,6A)}{400\ V} = 63\ \mu s$$

Si troverà che la dissipazione di potenza del varistor è:

$$V_{MAX} \frac{I_P}{2} tf = 398\ V \frac{0,22\ A}{2} (63)(10^{-6})\ s\ (55\ Hz) = 0,15\ W$$

Osservazioni fatte indicano che le perdite nella bobina ed il carico riflesso del secondario ridurranno questo valore a circa metà ossia a circa 75 mW. Usando il fattore di riduzione delle prestazioni per una temperatura ambiente di 110°, che è 0,53, si trova che è necessario un varistor con dissipazione di 0,15 W almeno. I parametri del varistor sono ora definiti: V deve essere di almeno 186 V ad 1 mA, ma inferiore a 398 V a 0,34 A, mentre la dissipazione di potenza deve essere di almeno 0,15 W. Rispondono a questi requisiti sia il V220MA2A che il V270MA4B.

Come è stato illustrato da questi esempi, l'uso dei varistori GE-MOV® II nei circuiti per autoveicoli è appropriato sia dal punto di vista tecnico che economico. Il sistema di progettazione è identico a quello usato per le applicazioni in altri ambienti. Verifiche sperimentali del grado di protezione si possono fare usando le forme d'onda standard pubblicate dai ricercatori d'ingegneria automobilistica.

BIBLIOGRAFIA

1. Preliminary Recommended Environmental Practices for Electronic Equipment Design - SAE, 2 Pennsylvania Plaza, N.Y., N.Y. 10001.
2. Electromagnetic Susceptibility Test Procedures for Vehicle Components (except Aircraft) SAE, 2 Pennsylvania Plaza, N.Y., N.Y. 10001.

CAPITOLO 7

PROVE SUI VARISTORI

7.1 INTRODUZIONE

Come qualsiasi componente, i varistori ad ossidi metallici possiedono un certo numero di parametri che possono essere identificati e misurati in varie maniere. Ma per semplificare le procedure di prova, i parametri da misurare potrebbero essere ridotti a quei pochi che sono essenziali. Le prove si devono anche condurre secondo metodi unificati per assicurare la corrispondenza tra le prove fatte dal produttore e quelle fatte dall'utente. I parametri essenziali del varistor sono stati definiti nel Capitolo 3. Questo capitolo fornirà i particolari di come si effettua il controllo di questi parametri, e descriverà i metodi di prova adatti usando circuiti semplificati, e fornirà un elenco delle apparecchiature disponibili.

Si deve precisare che tutte le prove devono essere condotte ad una temperatura di 25°C, in mancanza di indicazioni diverse. Inoltre, i circuiti ed i metodi di prova indicati in questo capitolo si intendono come guida generale, e non possono essere applicati tali e quali all'apparecchiatura di prova in possesso dell'utente. Dato che le prove fanno frequente uso di alte tensioni e correnti, si devono mettere in atto le opportune misure di sicurezza.

7.2 SCOPI DELLE PROVE

I controlli che l'utilizzatore dovrà intraprendere sui varistori dipenderanno in notevole misura dalla preliminare conoscenza sia del componente che della sua applicazione. Fattori da tenere in conto sono la severità relativa dell'applicazione (sia dal punto di vista elettrico che da quello ambientale), il numero di esemplari che si intende usare, ed i possibili effetti dannosi dell'applicazione o del funzionamento non corretti del componente. Ulteriori considerazioni da fare riguardano le risorse disponibili all'utilizzatore e l'eventuale convenienza economica dell'uso alternativo di queste risorse rispetto ad un controllo più estensivo del varistor. I fabbricanti di apparecchiature che stanno progettando di inserire una protezione dai transitori nei loro prodotti avranno obiettivi diversi nella prova dei varistori, nei confronti di un utilizzatore che vuole semplicemente aggiungere alcuni di questi elementi ad un'apparecchiatura già esistente come supplemento di protezione. Le prove dovranno infine rispondere a quesiti diversi a seconda del punto nel ciclo del progetto del sistema o della valutazione ed acquisizione dei componenti nel quale si debba eseguire la verifica.

7.2.1 Valutazione ingegneristica

Per il fabbricante di apparecchiature, il processo di valutazione e di acquisizione di un nuovo componente comincia con una presa in esame iniziale del componente stesso. Di solito il tecnico dei circuiti o dei sistemi richiederà alcuni campioni del componente preso in considerazione per effettuare una valutazione del medesimo inserito nel prototipo dell'apparecchio in progetto. Il suddetto tecnico può richiedere indicazioni al suo componentista per poter effettuare una scelta tra i vari componenti presenti sul mercato. È importante mettere a fuoco le caratteristiche e le prestazioni fondamentali per verificare se il componente potrà comportarsi nel modo che ci si attende. Di norma la tensione del varistor, la tensione di limitazione, la corrente a regime, la resistenza d'isolamento e la capacità dei campioni verranno misurate secondo i metodi del paragrafo 7.3. Ritenendo che sia stato scelto un tipo di varistor, secondo gli esempi di progettazione pratica del Capitolo 4, il tecnico dovrà naturalmente verificare che il componente si comporti secondo le aspettative quando viene montato sul circuito sperimentale. Si deve anche verificare che le variazioni dei parametri entro le relative specifiche, vadano d'accordo con le necessità della particolare applicazione. Dovranno essere misurate o calcolate la corrente o l'energia degli impulsi presenti nel circuito, la loro forma d'onda, insieme alla frequenza della loro apparizione. Queste caratteristiche dei transitori probabili dovranno essere confrontate con le curve del numero di impulsi ammissibili rispetto alla durata della vita utile, e con le prestazioni di potenza dissipata del tipo di varistor prescelto. Qualora si abbiano a disposizione adatte apparecchiature, si potranno verificare le prestazioni del varistor iniettando nel medesimo, sia isolato che montato nel circuito prototipo, degli impulsi transitori. Per una discussione sugli equipaggiamenti di prova per i transitori e sulle onde di prova, vedere i paragrafi 7.6 e 7.7 di questo capitolo.

7.2.2 Qualificazione del prodotto

Nelle organizzazioni di alcuni clienti, la scelta e la valutazione del varistor come componente può essere affidata ad un gruppo specializzato che segue la collocazione tecnica e l'affidabilità di un componente. Il risultato finale di questa valutazione potrà essere un ordine di acquisto che elenca i requisiti e le prestazioni elettriche e meccaniche del componente, e possibilmente approva i fornitori dell'elemento. Verrà spesso usato un capitolato di qualificazione del prodotto, per dettagliare i controlli elettrici ed ambientali ai quali dovrà essere sottoposto un campione del componente in predicato di acquisto, e che da questo dovranno essere superati prima dell'approvazione. Spesso viene richiesto ai fabbricanti di fornire dei dati a sostegno delle loro prove interne, per completare e minimizzare i controlli di collaudo. Le prove elettriche suggerite sono (con determinate condizioni e limiti): tensione nominale del varistor V_N; tensione massima di limitazione V_C; corrente continua a regime normale I_D (facoltativa, specialmente per applicazioni in alternata); resistenza d'isolamento; capacità. Le misure di queste caratteristiche dovranno

essere fatte spesso nel ciclo componente/apparecchio, ed anche in seguito; si dovrà inoltre prestare attenzione che esse non siano troppe o troppo complicate, ma neanche troppo poche per essere significative in rapporto alla particolare applicazione del componente. I requisiti di affidabilità riguardanti le condizioni di funzionamento e la vita probabile saranno spesso oggetto di specifica e dovranno essere verificati di solito alle prime fasi del processo di qualificazione del componente. Queste prove potranno essere eseguite a condizione di ambiente o temperatura di tipo speciale per sollecitare il componente e collaudare la sua idoneità all'uso od al progetto a cui dovrebbe essere destinato. Nel piano di collaudo si potrà comprendere una prova per verificare la resistenza ai picchi di corrente. Queste prove dovrebbero essere impostate ed eseguite molto attentamente (usando forme d'onda da 8 / 20 μs o da 10 / 1000 μs) in accordo con le raccomandazioni del Capitolo 3: i risultati dovranno essere corrispondenti al grafico del numero d'impulsi rispetto alla vita utile riferito al varistor prescelto. Si possono eseguire altre prove di collaudo per verificare l'integrità meccanica, la resistenza all'umidità, la saldabilità e la robustezza dei terminali. Queste prove dovranno essere di tipo standard ogni volta che è possibile, per assicurare la loro riproducibilità.

7.2.3 Controllo al ricevimento del materiale

Una volta che il componente è stato accettato, il fabbricante di apparecchiature vorrà controllare che le consegne siano formate da componenti corrispondenti al campione e con i requisiti previsti di qualità. Le consegne verranno collaudate per campioni al fine di verificare che la marcatura, l'aspetto, la finitura ed i parametri elettrici più importanti o critici siano regolari. Si deve in special modo evitare l'ingresso alle linee di montaggio a quei materiali che abbiano caratteristiche di tensione inesatte, allo scopo di minimizzare la ricerca di guasti e la rimaneggiatura. Per il collaudo di accettazione dei varistori GE-MOV® II, si raccomanda che il controllo per campioni comprenda la tensione nominale del varistor V_N provocata rispetto alle tensioni massime e minime elencate nei capitoli o nei contratti di acquisto. Un componente che sia al di sotto dei limiti di capitolato può portare ad una degradazione o ad un guasto prematuro del circuito. Se la caratteristica supera quella di capitolato, il componente non potrà dare la necessaria protezione dai transitori e potrà provocare danni di altra specie. Altre prove elettriche a campione frequentemente intraprese possono comprendere la resistenza d'isolamento e la capacità. Controlli quali la tensione massima di limitazione V_C e la corrente a regime normale I_D sono di solito eseguiti sulla base di verifiche periodiche.

7.2.4 Manutenzione in esercizio

Nelle prove di manutenzione in esercizio lo scopo è di verificare che il varistor continui a fornire la protezione per cui è stato predisposto oppure, nel caso di applicazione su circuiti molto critici, che il varistor non abbia subito un degrado. Dato che di solito il cambiamento delle caratteristiche di un varistor GE-MOV® II

in caso di sovraffaticamento, avviene nel senso di una minore resistenza, è estremamente improbabile che diminuisca la funzione protettiva se gli elettrodi non sono danneggiati. Il varistor dovrà essere esaminato fisicamente per scoprire fili staccati, zone dell'incapsulamento bruciacchiate o rotte, colature di stagno sui fili od altri segni evidenti di danni da surriscaldamento. Quando appare fisicamente accettabile il varistor potrà essere provato elettricamente.

La tensione nominale del varistor dovrà essere controllata rispetto ai limiti minimi previsti per il tipo in oggetto, usando il metodo del paragrafo 7.3.1. Se il varistor è interrotto, cortocircuitato oppure al di fuori di uno dei limiti di più del 10%, deve essere scartato. Si potrà anche misurare la corrente continua in esercizio normale: se questa supera il doppio di quella specificata il varistor ha subito una evidente degradazione e dovrà essere scartato. Se il varistor è fisicamente a posto e non mostra segni di degradazione a questi controlli elettrici, lo si potrà ritenere perfettamente funzionale.

7.3 MISURA DELLE CARATTERISTICHE DEI VARISTORI[1]

7.3.1 Tensione nominale del varistor V_N

È misurata ad una corrente continua di prova I_N, di 1 mA per la maggior parte dei tipi di produzione. Un circuito semplificato per eseguire questa prova in modo strumentale, si vede in Figura 7.1; esso è adatto per varistori con tensione nominale fino a 300 V eff. Al di là dei 300 V eff. occorrerà una maggior tensione di alimentazione. La resistenza R1 ha un duplice scopo. Insieme all'alimentatore a tensione variabile E1, essa forma un generatore di corrente "quasi" costante che fornisce fino a 6 mA quando l'interruttore S1 è chiuso. Inoltre R1 è usata come resistenza sensibile alla corrente per misurare la corrente che passa attraverso il varistor in prova. Per usare il circuito, l'operatore mette il commutatore S2 in posizione I ed S3 in posizione V_N. Si infila quindi nello zoccolo il componente da provare e si chiude S1. Si regola quindi E1 fino ad ottenere una lettura di 100 ± 5 V sul voltmetro digitale. In R1 passerà una corrente di circa 1 mA. Quando il commutatore S2 è sistemato in posizione V, il voltmetro indicherà la tensione del

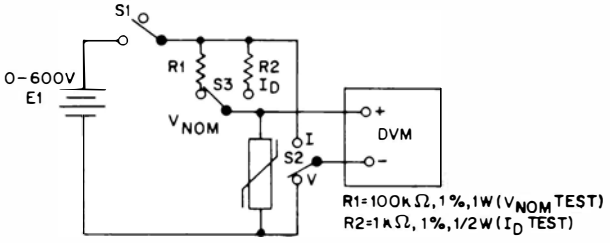


Figura 7.1 - Circuito semplificato per le prove della tensione del varistor e della corrente c.c. in esercizio normale.

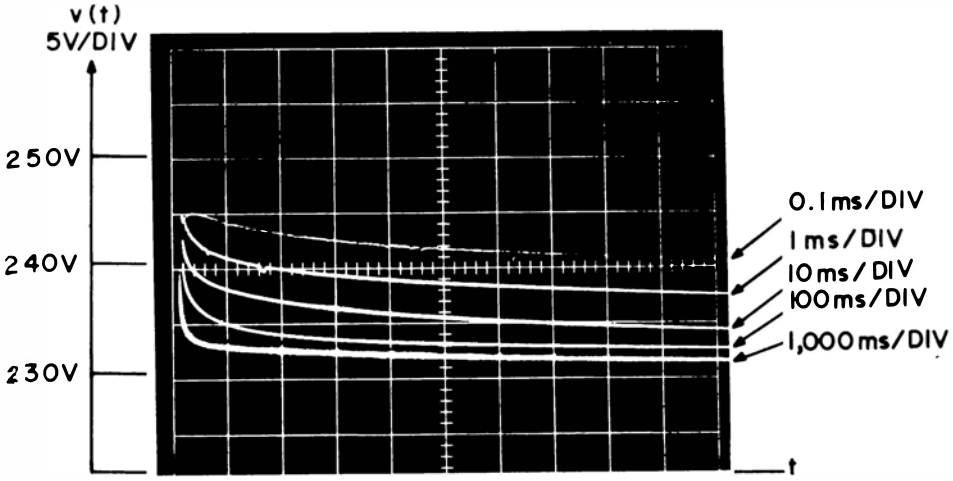


Figura 7.2 - Caratteristiche tensione-tempo V(T) di un varistor GE-MOV® II (V130LA10A) che funzioni ad una corrente continua costante di 1,0 mA.

varistor. I valori di R1 e della tensione di alimentazione E1 devono essere accuratamente indicati su una scala per gli altri punti di misura tensione-corrente.

Se la prova della tensione del varistor è implementata su un sistema automatico di controllo, occorre permettere che trascorra un tempo di "*imbevimento*" di 20 ms al minimo, dopo l'applicazione della corrente di prova e prima della lettura della tensione. Questo ritardo è necessario allo scopo di permettere alla tensione del varistor di stabilizzarsi ad un valore di regime. La Figura 7.2 illustra il tempo di risposta di un varistor campione con una corrente costante applicata di 1 mA. Come si può notare, la tensione del varistor può salire all'inizio ad un valore maggiore anche del 6% rispetto al valore finale. Con un tempo di assorbimento di 20 o più millisecondi, il valore misurato avrà una differenza inferiore al 2% rispetto al valore di regime.

Per quei modelli di varistor che vengono comunemente usati sulle linee di distribuzione elettrica a 60 Hz, si possono stabilire dei limiti per la V_N per una corrente di picco applicata di 1,0 mA. Se l'utilizzatore preferisce eseguire una prova in c.a., si usa un'impostazione dello schema analoga alla Figura 7.1. tranne per il fatto che all'alimentatore c.c. si sostituisce un Variac™ ed il voltmetro è sostituito da un oscilloscopio. Questo circuito equivale a quello di un tipico strumento tracciatore di curve.

Per evitare di interessarsi eccessivamente ad anomalie di poco conto nella misura, si devono mettere in evidenza tre fenomeni comportamentali dei varistori ad ossidi metallici. Per prima cosa, è normale che la tensione di picco del varistor misurata con una corrente alternata abbia un valore dal 2 al 5% maggiore dei valori

in c.c. di Figura 7.3. Questa differenza tra c.a. e c.c. non è inattesa, dato che un quarto di ciclo di una frequenza di 60 Hz dura molto meno dei 20 ms di assestamento minimo necessario per la lettura in c.c.

In secondo luogo, è normale che la tensione del varistor aumenti leggermente al primo passaggio di una corrente elettrica, come si può vedere in Figura 7.4. Questo fenomeno può essere considerato una stabilizzazione delle caratteristiche del varistor dopo il "primo impatto" della corrente. Durante una normale misura, la deriva della tensione è di norma inferiore all'1%. Questa deriva di tensione è insignificante nella maggioranza delle misure, ma può essere avvertibile quando si

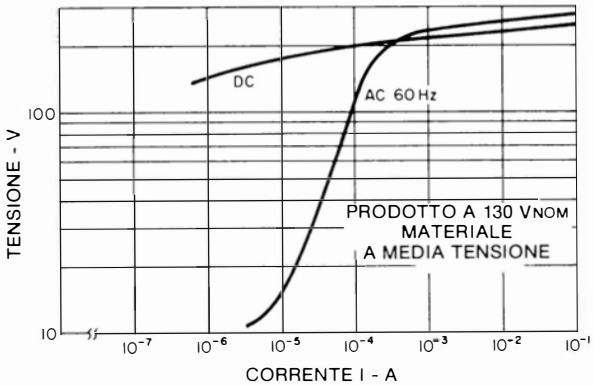


Figura 7.3 - Curve caratteristiche in c.a. ed in c.c..

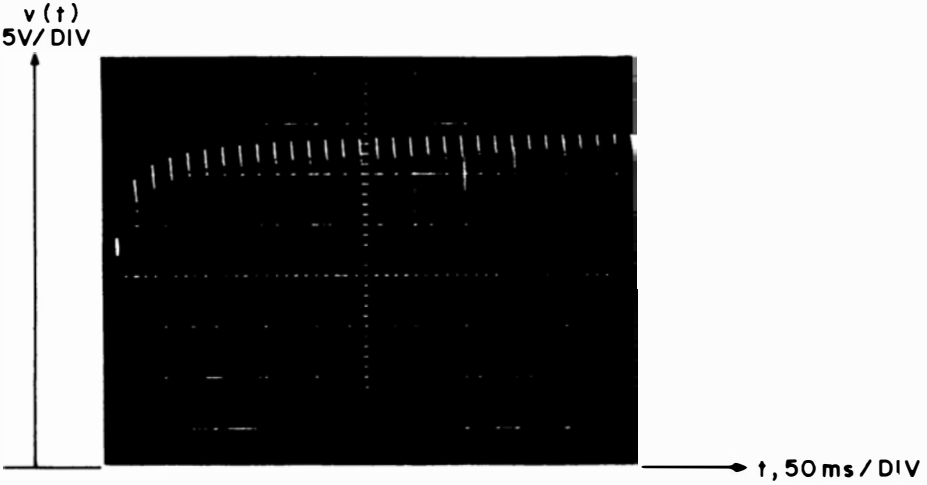


Figura 7.4 - Tensione del varistor (V130LA10) ai cicli iniziali del funzionamento a 60 Hz, con una corrente di picco di 1,0 mA.

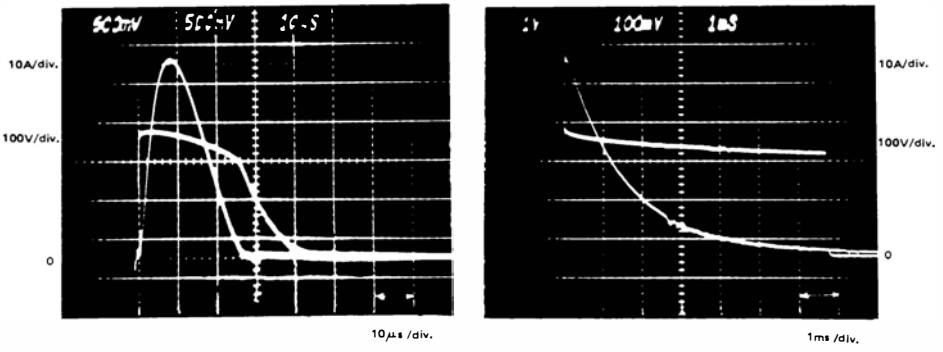
legge la tensione su un voltmetro digitale, come nel metodo di prova di Figura 7.1. L'osservazione del display del voltmetro digitale deve essere fatta poco dopo l'applicazione dell'alimentazione, e deve essere limitata a non più di tre cifre significative.

In terzo luogo, è cosa normale che la caratteristica tensione-corrente presenti una leggera asimmetria nella polarità, applicando a lungo una sollecitazione elettrica in c.c.. La tensione del varistor aumenterà nella stessa direzione della polarità della sollecitazione, mentre alla polarità opposta rimarrà costante o diminuirà. L'effetto sarà molto più evidente su di un varistor che è stato sottoposto a sollecitazioni impulsive unipolari oppure a prove accelerate di vita utile in c.c.. Per ottenere quindi dei risultati coerenti durante le prove ad impulsi unidirezionali od a quelle di vita, è essenziale unire i campioni di un contrassegno che ne indichi la polarità. Per letture non protratte nel tempo questo effetto è però insignificante nella maggior parte dei casi.

7.3.2 Tensione massima di limitazione Vc

Come già detto nel Capitolo 3, la tensione di limitazione di un varistor è definita meglio considerando gli impulsi di corrente applicati ai terminali invece della tensione applicata. Per definire la tensione di limitazione di un varistor si possono usare due tipici impulsi di corrente, ossia gli impulsi da 8 / 20 μs e quelli da 10 / 1000 μs. La Figura 7.5 mostra le tipiche forme d'onda di questi due impulsi di prova per i varistori.

La tensione di limitazione di un dato tipo di varistor ad una determinata corrente è proporzionale alla tensione del varistor per un certo fattore. Potrà quindi essere sufficiente il controllo della tensione nominale in riferimento alle specifiche, per poter avere una ragionevole sicurezza che anche le prescrizioni riguardanti la



a) onda da 8/20 μs, Ip = 50 A, Vc = 315 V

b) onda da 10/1000 μs, Ip = 50 A, Vc = 315 V

Figura 7.5 - Tipiche forme d'onda per la prova di limitazione di tensione (varistor GE-MOV®II tipo V130LA10A).

tensione massima di limitazione saranno soddisfatte. Quando si ravvisa la necessità di eseguire un controllo della V_C, dovranno essere impiegati degli speciali generatori di impulsi transitori. Per impulsi più brevi di 8 / 20 μs, si devono prendere delle precauzioni per evitare un erroneo "overshoot" nella misura della tensione di limitazione. Nel paragrafo 7.6 troveremo delle informazioni generali sui generatori di impulsi transitori; qui di seguito invece descriveremo brevemente l'effetto "overshoot".

I fogli dati dei varistori GE-MOV® II mostrano le caratteristiche V-I dei componenti sulla base della tensione massima che appare ai capi dell'elemento durante un impulso di corrente da 8 / 20 μs. Se si applicano impulsi di uguale ampiezza ma con minore tempo di salita appariranno ai capi del varistor delle tensioni maggiori. Queste maggiori tensioni, dette di "overshoot" sono in parte il risultato di un aumento intrinseco nella tensione del varistor, ma principalmente derivano dall'ef-

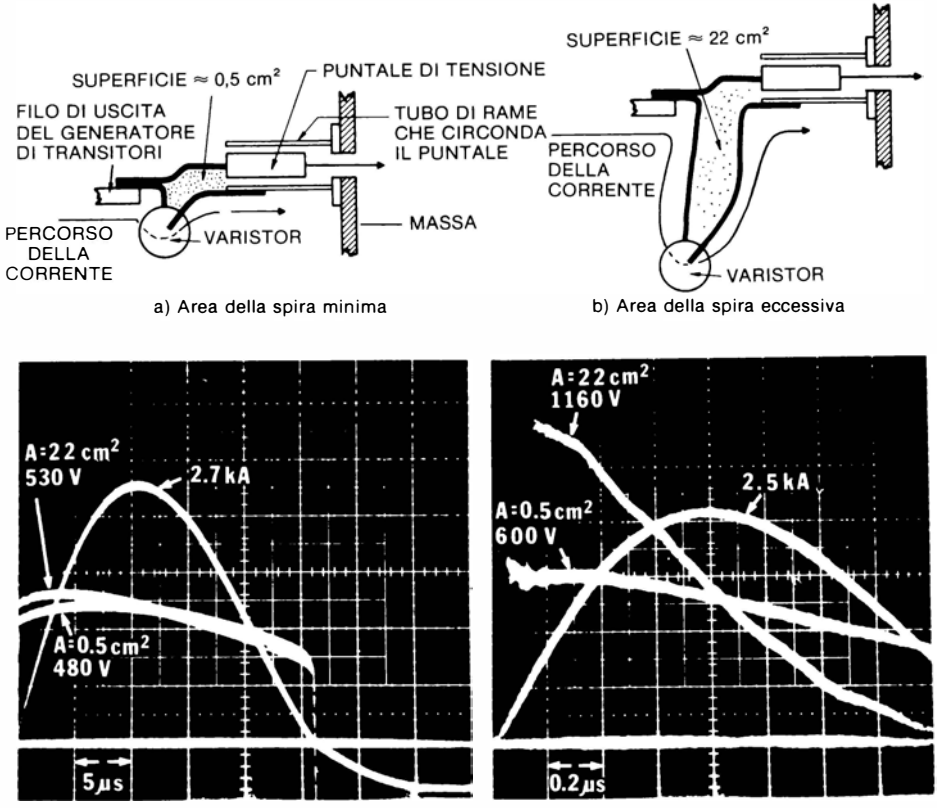


Figura 7.6 - Effetto della lunghezza dei terminali sulla "sovraelongazione".

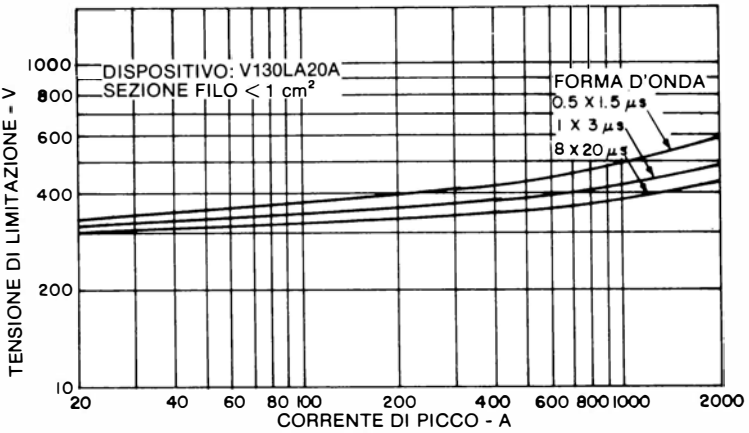


Figura 7.7 - Tipica "sovraelongazione" per un varistor con reofori a filo ed impulso di corrente ripido.

fetto induttivo dei fili di collegamento, che non può essere eliminato. Di conseguenza, dato che in molte applicazioni ci saranno impulsi di corrente con fianco di risalita più ripido rispetto a quello convenzionale da 8 µs, bisogna stare molto attenti a riconoscere il contributo della tensione prodotta dall'induttanza dei fili di collegamento[1].

La tensione del varistor, a causa della sua non linearità, aumenta solo di poco quando aumenta l'ampiezza della corrente dell'impulso. La tensione dovuta all'induttanza dei fili è quasi perfettamente lineare ed aumenta molto quando sono applicati degli impulsi di corrente elevata a fronte ripido. Questo è il motivo per cui non è realistico prescrivere delle tensioni di limitazione ottenute con dispositivi aventi connessioni a filo e con impulsi di corrente aventi un tempo di salita inferiore a 0,5 µs, a meno che la geometria del circuito non sia controllata e descritta in modo molto accurato.

Per illustrare l'effetto della lunghezza dei fili sull'"overshoot", sono stati usati due metodi di misura. Come si vede nelle Figure 7.6a e 7.6b, i fili del varistor e del puntale di misura della tensione circoscrivevano un'area di 0,5 cm^2 e di 22 cm^2 rispettivamente.

I corrispondenti valori misurati della tensione si vedono negli oscillogrammi di Figura 7.6c e 7.6d. Con un fronte di salita della corrente lento (8 µs), c'é poca differenza nelle tensioni che si hanno con la spira grande e con quella piccola, anche se la corrente di picco raggiunge i 2,7 kA. Con un fronte di salita di 0,5 µs, la tensione di picco registrata con la spira più grande ha un valore circa doppio di quella dovuta alla spira più piccola. (Si noti sulla Figura 7.6d che al culmine della corrente si ha L di/dt = 0 e che le due letture di tensione sono uguali; prima del picco L di/dt è positiva, mentre dopo il suo valore è negativo).

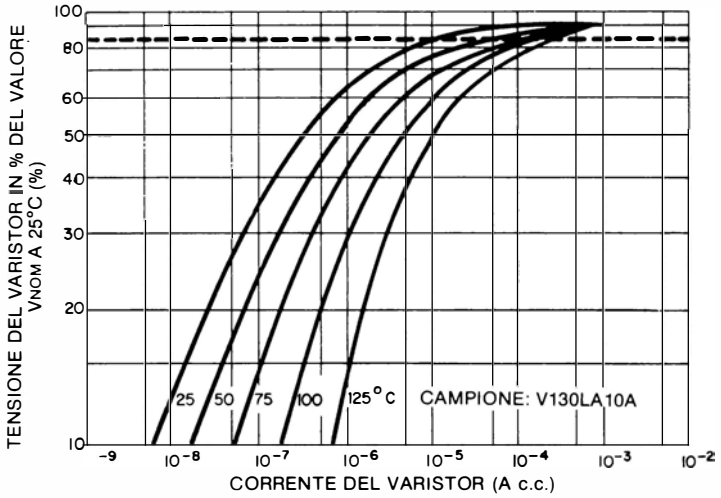


Figura 7.8 - Dipendenza tipica della temperatura della corrente di riposo in c.c. - tipo del varistor: V130LA10A.

A seguito di quanto procede, quando si fanno delle misure ed anche quando si progetta un circuito di protezione, è importantissimo stare in guardia circa gli effetti della lunghezza dei fili (o più precisamente dell'area della spira da essi formata), nel collegare il varistor. Questo è di particolare importanza quando le correnti superano il valore di pochi ampere con un tempo di salita inferiore al microsecondo.

Adottando delle opportune precauzioni nel mantenere corti i fili, come si vede in Figura 7.6a, è possibile descrivere l'effetto "overshoot" come un aumento della tensione di limitazione in relazione al valore osservato con l'impulso da 8 / 20 μs. La Figura 7.7 mostra una famiglia di curve che indica l'effetto tra 8 e 0,5 μs di tempo di salita, a picchi di corrente che vanno da 20 a 2000 A. Ogni aumento nella lunghezza dei fili di connessione e dell'area compresa tra questi, produrrà un aumento della tensione che appare ai terminali del varistor, ossia della tensione applicata al carico protetto.

7.3.3 La corrente continua a regime normale I_D

Questa corrente viene misurata ad una tensione uguale a quella in c.c. di esercizio applicata ai capi del varistor $V_{m(c.c.)}$. Quando la resistenza di rivelazione della corrente R2 ha un valore di 1000 Ω, si può applicare il circuito di Figura 7.1. Il metodo di prova consiste nel regolare la tensione di alimentazione E1 ad un determinato valore, con l'interruttore S1 chiuso ed il commutatore S2 in posizione V. In seguito si posizionano S2 in I ed S3 in I_D. Si apre ora S1 e si inserisce nello zoccolo il componente da provare richiudendo poi S1. La lettura sul voltmetro

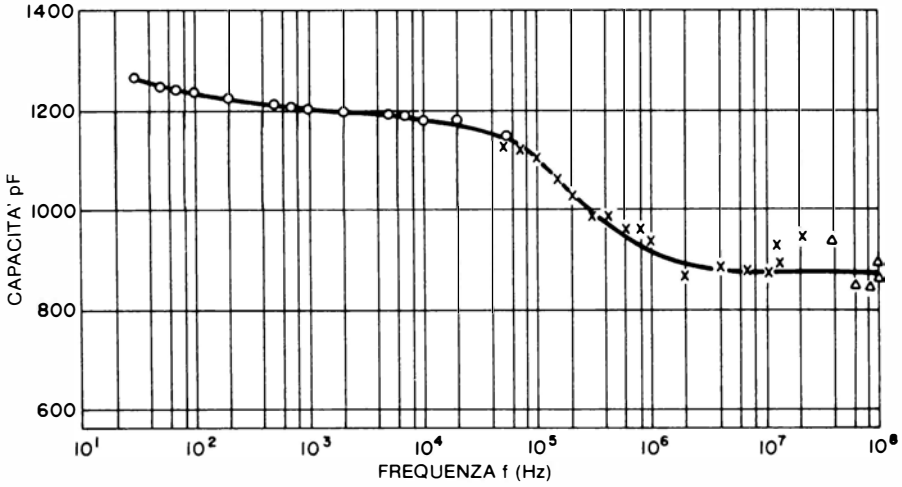


Figura 7.9 - Variazione della capacità con la frequenza.

digitale deve quindi essere convertita in corrente. Se per esempio è specificata una corrente massima a regime normale di 200 μA, le lettura massima accettabile sul voltmetro digitale dovrà essere di 0,200 V.

La misura della corrente continua a regime normale può risultare sensibile a fenomeni di comportamento del componente, che possono consistere nella stabilizzazione di "*primo impatto*" e nella polarizzazione delle caratteristiche V-I, come descritto nel paragrafo 7.3.1. Se il componente in prova ha una precedente storia di funzionamento polarizzato, si devono sistemare dei contrassegni di polarità e si devono interpretare conseguentemente i risultati della prova.

Il valore della corrente continua a regime normale può anche dipendere dalla temperatura ambiente. Questo non avviene per le caratteristiche del varistor misurate per correnti di 1 mA o superiori, che sono relativamente insensibili alla temperatura ambiente. Con una $V_{m(c.c.)}$ circa uguale all'85% della V_N, la Figura 7.8 mostra il tipico andamento della corrente continua a regime normale di un varistor tipo V130LA10A nel campo che va dai 10 ai 20 μA alla temperatura ambiente. I_D aumenta fino a circa 80 μA alla temperatura di 85°C, la massima temperatura di esercizio senza riduzione delle prestazioni nominali.

7.3.4 Capacità

Dato che la massa di cui è composto un varistor GE-MOV® II agisce come un dielettrico, il componente ha una capacità che è direttamente proporzionale alla superficie ed inversamente allo spessore. Quindi la capacità di un varistor GE-

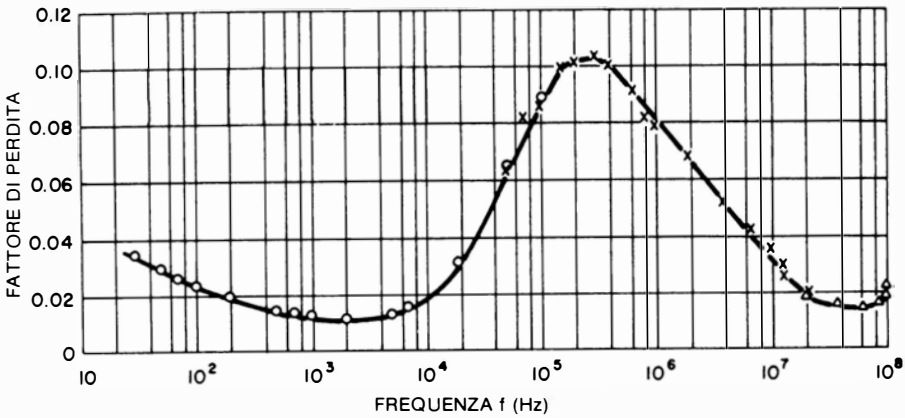


Figura 7.10 - Variazione con la frequenza del fattore di perdita.

MOV® II è una funzione della sua tensione e dell'energia dissipabile. La tensione nominale è determinata dallo spessore del componente, mentre la dissipazione di energia è direttamente proporzionale al suo volume.

La capacità dei varistori GE-MOV® II può essere misurata usando un normale ponte capacitivo; si è trovato che varia con la frequenza, come si vede in Figura 7.9. Normalmente le misure di capacità sono fatte ad 1 MHz. Anche il fattore di perdita dipende dalla frequenza, come si vede in Figura 7.10

Se misurati in presenza di una polarizzazione in c.c., la capacità ed il fattore di perdita mostrano leggeri cambiamenti fino a qundo la tensione avvicina o supera il valore V_N. La variazione di capacità dovuta all'applicazione di una tensione continua od alternata può permanere una volta tolta la tensione medesima, e tornare gradualmente al valore che aveva prima dell'applicazione della polarizzazione. Per questo motivo è importante, prima di effettuare una misura della capacità di un varistor GE-MOV® II, conoscere la sua storia elettrica.

7.3.5 Caratteristiche varie

Dalle misure fondamentali finora descritte si possono derivare un certo numero di misure caratteristiche, che comprendono l'esponente non lineare (alfa), la resistenza statica, l'impedenza dinamica ed il rapporto di limitazione della tensione. Si tratta di caratteristiche derivate nel senso che si possono ricavare con il calcolo mediante le equazioni fornite nel Capitolo 3. Questi dati possono però essere anche ottenuti mediante misure, con metodi analoghi a quelli già illustrati per la tensione nominale del varistor e la tensione massima di limitazione. Queste caratteristiche varie possono essere molto utili in certi casi perché permettono di fare un confronto tra i varistori GE-MOV® II ed altri tipi di componenti non lineari, come quelli a base di carburo di silicio, i raddrizzatori al selenio, oppure i diodi zener.

7.4 PROVE DI CONFERMA DELLE PRESTAZIONI DEI VARISTORI

7.4.1 Tensione efficace e c.c. in servizio continuo [$V_{m(c.a.)}$ *e* $V_{m(c.c.)}$]

Questi valori sono stabiliti in base a prove di vita utile condotte alla massima tensione nominale per il modello prodotto. Sono prove di solito condotte alla massima temperatura ambiente ammessa, od anche ad una temperatura maggiore, in modo di accelerare l'invecchiamento del componente. Nel Capitolo 8 verranno riportati alcuni risultati di queste prove. Salvo specifiche diverse, viene definita fine della vita utile una degradazione delle caratteristiche equivalente ad una deriva della V_N superiore al ± 10% rispetto al valore iniziale. Dopo questo momento il componente continuerà a funzionare, però il varistor non soddisferà più alle condizioni iniziali.

Un tipico circuito di prova della vita utile si vede in Figura 7.11. Se il varistor è destinato principalmente al funzionamento in tensione continua, l'alimentatore in c.a. dovrà essere sostituito da uno in c.c.. È opportuno munire i singoli varistori di un fusibile in modo da non interrompere la prova sugli altri componenti quando si brucia uno dei fusibili. I generatori di tensione devono essere regolati con una precisione del ± 2% e la temperatura della camera di prova deve essere regolata entro i ± 3°C. La camera deve contenere un ventilatore per la circolazione dell'aria al fine di assicurare l'uniformità della temperatura nel suo interno. I varistori devono subire una lettura iniziale delle caratteristiche alla temperatura ambiente, ossia a 25 ± 3°C. Essi dovranno in seguito essere tolti dalla camera per successive letture a 168, 500 e 1000 ore. Prima della lettura delle caratteristiche occorre far passare un minimo di 20 minuti per garantire il raffreddamento dei componenti fino alla temperatura ambiente.

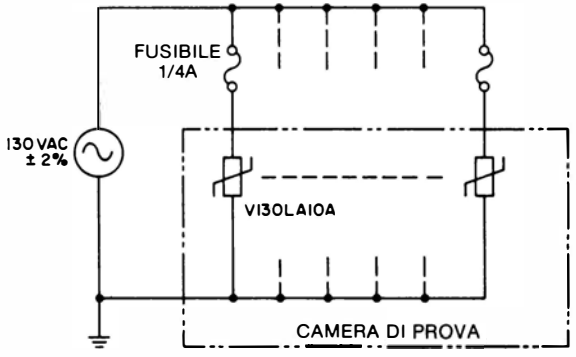


Figura 7.11 - Circuito semplificato per la prova della vita utile.

7.4.2 Corrente di picco del transitorio, energia, durata di vita con impulsi e dissipazione di potenza.

Per la prova occorrono speciali apparecchiature per generare grandezze transitorie. I dati riguardanti gli equipaggiamenti disponibili in commercio si trovano nella Tabella 7.3, e nel paragrafo 7.6 viene descritto un esempio di circuito di prova. Poiché per eseguire queste prove bisogna accumulare un'alta energia a tensioni elevate, specialmente per i modelli più grandi di varistori GE-MOV® II, l'apparecchiatura è necessariamente molto costosa e deve essere azionata rispettando le precauzioni di sicurezza.

La corrente di picco nominale I_{tm} dei varistori GE-MOV® II è basata su un impulso di prova con forma d'onda di 8 / 20 μs. Il foglio dati comprende nella tabella delle prestazioni un valore massimo ad impulso singolo. Un grafico di vita utile con impulsi definisce la prestazione alla corrente di picco provocata da impulsi di maggior durata, del tipo dell'onda di 10 / 1000 μs. Una famiglia di curve definisce il numero di impulsi possibile con una data durata d'impulso ed una data corrente di picco. La fine della vita utile, come precedentemente accennato, è segnata da una deriva del ± 10% nella tensione nominale del varistor.

La dissipazione nominale di energia W_{tm} è stabilita con un'onda di prova che genera un impulso di corrente da 10 / 1000 μs. Questa forma d'onda è stata scelta essendo la miglior onda normalizzata per quei casi di applicazione dove interessa di più l'energia dell'impulso che la corrente di picco. La determinazione diretta dell'energia richiede che l'utilizzatore integri rispetto al tempo, il prodotto della tensione e della corrente istantanea. Questa integrazione è complicata da eseguire, e nelle apparecchiature di generazione dei transitori non è in genere disponibile una possibilità di integrazione.

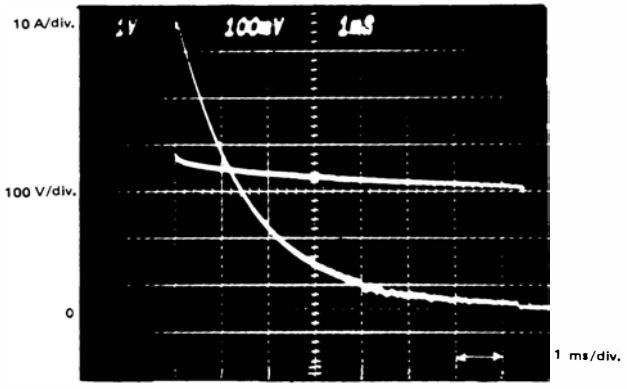


Figura 7.12 - Forme d'onda per la prova ad impulso.
Forma d'onda da 10 x 1000 μs, I_P = 67 A, V_C = 315 V

TABELLA 7.1
CONTROLLO DELLA CORRENTE DI TRANSITORIO, DELL'ENERGIA, DELLA VITA A REGIME IMPULSIVO E DELLA DISSIPAZIONE DI POTENZA

PARAMETRO DI PROVA	N° di impulsi alla corrente nominale polarità alternativa	Forma dell'onda di prova (μs)	Periodo minimo d'impulso (s)
Corrente max di picco	1 (stessa polarità della lettura)	8/20	NA
Vita ad impulsi/energia, dissipazione di potenza	2	10/1000	50
Vita sotto impulsi	10	8/20	25
Vita sotto impulsi	100	8/20	12

La tensione e la corrente di picco sono però facilmente misurabili con le apparecchiature a disposizione. La prestazione energetica può quindi essere controllata indirettamente applicando al campione la corrente impulsiva di picco prescritta sotto forma di impulso di corrente da 10 / 1000 μs. Si può quindi valutare l'energia dissipata nel varistor a partire dalla forma d'onda nota dell'impulso. Per una forma d'onda di 10 / 1000 μs, l'energia approssimativa è data dall'espressione $E = 1{,}4\ V_C\ I\ \tau$. Per una discussione riguardante la dissipazione energetica per le diverse forme d'onda vedi il Capitolo 4.

Per esempio, il varistor modello V130LA10 ha una prestazione al singolo impulso, per forma d'onda di 10 / 1000 μs, di circa 75 A di picco ed una tensione massima di limitazione a 75 A di circa 360 V. Quindi il calcolo stimato della dissipazione energetica fornisce un valore di 38 J.

La potenza nominale dissipata in regime transitorio, P_{tam}, è definita come la massima potenza media degli impulsi di prova che si susseguono con una data cadenza periodica. Essa viene calcolata dividendo la dissipazione energetica stimata per il periodo dell'impulso di prova. Si possono quindi provare i varistori per questa prestazione applicando due o più impulsi alla corrente nominale, intervallati da un determinato periodo. Per esempio un varistor modello V130LA10A ha una durata di vita a regime impulsivo di due impulsi di prova da 10 / 1000 μs con corrente di picco di circa 65 A. La dissipazione energetica stimata per ogni impulso, calcolata come nell'esempio precedente, è di circa 30 J. Se dopo il primo impulso di prova si lasciano passare 50 s, la dissipazione media di potenza potrà essere calcolata in circa 0,6 W, che corrispondono alle specifiche. Bisogna notare che i varistori GE-MOV® II non sono previsti per funzionamento continuo con alti livelli di transitori applicati. La dissipazione di potenza in transitorio è basata su un numero finito di impulsi, e si devono osservare le prescrizioni riguardanti il numero di impulsi ammessi durante la vita utile del varistor. Vedi fig. 7.12

La tabella 7.1 suggerisce un programma di prova per controllare la durata di vita di un varistor sottoposto a transitori ed impulsi, con il minimo dispendio di tempo. Per ciascun livello di prova occorre usare dei campioni nuovi e la messa fuori uso verrà rilevata a seconda dei criteri di specifica.

7.4 3 Dissipazione di potenza in regime continuo

Dato che i varistori GE-MOV® II sono usati principalmente per la soppressione dei transitori, le loro prestazioni di potenza dissipata sono state definite e provate in regime transitorio impulsivo. I dispositivi devono essere applicati come sensori di soglia o regolatori grossolani di tensione, risulterà più adatta una prova a potenza continuativa. Questa prova aiuterà l'utilizzatore a stabilire se il componente è adatto per la sua particolare applicazione.

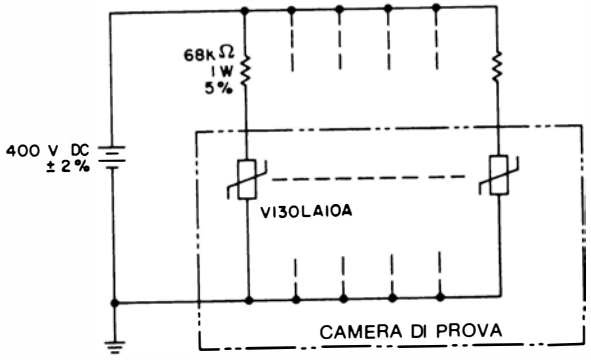


Figura 7.13 - Circuito di prova per la durata a potenza costante.

Un circuito per la prova a dissipazione di potenza continua è mostrato in Figura 7.13. L'alimentatore in corrente continua deve essere regolato per una tensione circa doppia rispetto alla tensione nominale del lotto del varistor in prova. In questo modo si mantiene nel campione una dissipazione di potenza quasi costante. Dato che il circuito suddivide la potenza in parti pressoché uguali tra la resistenza serie ed il varistor in prova, si sceglierà il valore della resistenza in serie in modo da ottenere semplicemente il valore della dissipazione prescritto nella prova. Con i componenti di Figura 7.13 si ottiene una dissipazione quasi costante di circa 0,6 W.

7.5 PROVE MECCANICHE ED AMBIENTALI SUI VARISTORI

7.5.1 Introduzione

Sono state proposte molte prove per stabilire l'affidabilità dei componenti elettronici sottoposti a sollecitazioni meccaniche od ambientali. Per quanto i singoli fabbricanti di apparecchiature possano specificare i loro controlli personali

sui contratti di acquisto dei componenti, queste prove sono spesso basate su una prescrizione equivalente alla MIL-STD. È quindi conveniente riassumere queste prove secondo i termini MIL-STD. Dal momento che le prestazioni dei varistori GE-MOV® II possono variare a seconda della serie e del modello, le condizioni di prova ed i limiti di tolleranza dovranno essere scritte sulle specifiche particolareggiate.

I varistori GE-MOV® II sono disponibili in una serie di alta affidabilità. Questa serie è soggetta alla maggior parte delle prove di sollecitazione meccanica ed ambientale, compreso il collaudo al 100% ed il condizionamento di processo, sempre al 100%. Maggiori particolari si troveranno nel capitolo 9.

7.5.2 Prove di riconiscimento UL

I varistori GE-MOV® II sono stati provati dagli Underwrites Laboratories, Inc. (UL) e sono stati omologati come componenti da montare in parallelo alla linea, tipo varistor, N° UL E75961. Le prove sono state progettate dalla UL e comprendono la scarica (resistenza alla scarica capacitiva) l'espulsione (di materiali conduttori), la vita utile, la vita utile prolungata e l'infiammabilità (prova UL492).

7.6 LA STRUMENTAZIONE PER LA PROVA ELETTRICA DEI VARISTORI

7.6.1 Introduzione

La maggior parte delle prove sui varistori GE-MOV® II può essere eseguita con circuiti relativamente semplici e con apparecchiature poco dispendiose sul banco del laboratorio. Molti utenti che dispongono di sistemi di controllo automatici di tipo versatile potranno trovare più economico programmare questi sistemi per le prove a bassa corrente sui varistori. Come osservato in precedenza, la prova agli impulsi di corrente media od alta richiederà attrezzature di prova specializzate. La Tabella 7.3 è un elenco parziale delle apparecchiature e dei sistemi di prova disponibili, che possono essere usati per il controllo dei varistori. La si deve considerare una guida destinata solo ad illustrare i tipi generici di apparecchiature offerte dal mercato.

7.6.2 Generatori di impulsi

Un metodo conveniente per generare correnti o tensioni impulsive consiste nell'accumulare lentamente l'energia in un circuito a condensatore per poi scaricarla bruscamente nel varistor da provare. Gli elementi di accumulazione di energia che si possono usare per questo scopo comprendono le linee (a costanti concentrate o distribuite) ed i semplici condensatori, a seconda della forma d'onda che si desidera per la prova. La Figura 7.14 mostra uno schema semplificato degli elementi fondamentali di un generatore di impulsi.

Lo schema rende l'idea di circuito usato per generare onde con decremento

esponenziale. L'alimentatore E1 viene usato per caricare il condensatore C che accumula energia fino ad una data tensione a circuito aperto, quando l'interruttore S1 è chiuso. Quando l'interruttore S2 (un ignitron od altro dispositivo a scarica comandata) è chiuso, il condensatore C si scarica attraverso gli elementi formatori

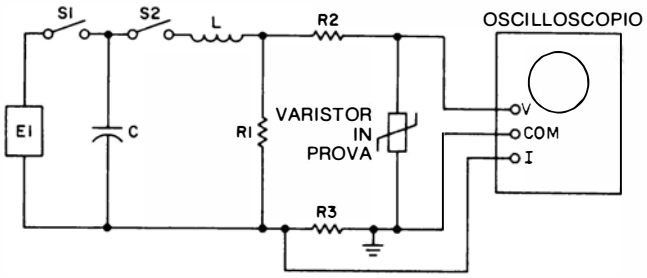


Figura 7.14 - Schema semplificato del generatore di impulsi transitori.

d'onda del circuito nel dispositivo soppressore in prova. Con capacità dell'ordine di 1-10 μF e con tensioni di carica che vanno da 10 a 20 kV, si potranno ottenere i tipici impulsi da 8 / 20 μs o da 10 / 1000 μs, dimensionando in modo opportuno i componenti formatori d'onda L, R_1 ed R_2, secondo il normale progetto dei generatori di transitorio.[2,3,4,5]

7.6.3 Strumentazione di misura

Le misure con i transitori comprendono due aspetti delle applicazioni del varistor: (1) rivelazione dei transitori per valutare la necessità di protezione e (2) misure di laboratorio per valutare la prestazione del varistor. La rivelazione dei transitori si può limitare alla registrazione dell'evento di sovratensioni transitorie in un particolare sistema oppure può comprendere misure più dettagliate di tutti i parametri che possono essere identificati. La semplice rivelazione può essere portata a termine mediante strumenti indicatori o registratori dei picchi, sia di tipo commerciale che costruiti su specifica del cliente. Le Tabelle 7.2 e 7.3 danno un elenco parziale di questi strumenti.

La strumentazione di laboratorio e la rivelazione con strumentazione sufficiente possono richiedere notevoli investimenti, che in primo luogo sono destinati ad oscilloscopi, macchine fotografiche e sensori tarati. Una trattazione particolareggiata di questi sistemi va oltre gli scopi di questo manuale; si consultino piuttosto i maggiori produttori di oscilloscopi, nonché le pubblicazioni disponibili.

7.7 ONDE DI PROVA E STANDARD

Le procedure di prova dei varistori descritte in questo capitolo sono state ideate per assicurare l'uniformità con standardizzazioni applicabili,[6] ed anche per rispec-

TABELLA 7.2 - APPARECCHIATURE DISPONIBILI PER LE PROVE SUI VARISTORI*

TIPO E FABBRICANTE	MODELLO	PRESTAZIONI
Sistemi di prova ad alta tensione: E. Haefely and Co., Ltd. Basel, Switzerland U.S. Distributor: Rhode & Schwarz Sales Inc. 14 Gloria Lane Fairfield, NJ 07006	P12/P6R 7CL-6/P6T P35/CP70 CP360 CP1500	Transitori di tensione: 1,2/50, 0,5/700, 10/700, 100/700, 0,5/100 kHz e NEMP fino a 50 kV. Transitori di corrente: 8/20, 20/60, 10/1000 μs, fino a 50 kA.
Tracciacurve a memoria Tektronix, Inc P.O. Box 500 Beaverton, OR 97005 315-455-6661	577/177 (può usare anche 576)	Prove in alternata ed in continua fino a 1600 V di picco, con blocco di sicurezza e schermo a memoria.
Ponti automatici per capacità General Radio 300 Baker Ave. Concord, MA 01742 617-369-4400	1687	Frequenza di prova 1 MHz, 3 misure al secondo, precisione 0,01%, display digitale, controllo programmabile, controllo IEEE.
Sistema di prova per varistori Mastech, Inc. 478 E. Brighton Ave. Syracuse, NY 13210 315-478-3133	222F 342	0-2000 V, fino a 10 mA c.c., impulsi di 100 mA, visualizzazione digitale, programmazione dal pannello frontale. 0-100 kV a 10 A. Programmazione dal pannello frontale. Norme IEEE 4888.
Sistema di prova semiconduttori Teradyne, Inc. 183 Essex St. Boston, MA 02111 201-334-9470	T57 o Z27	0-1200 V, fino a 10 mA, pilotaggio a computer, uscita con stampante in linea, stazioni di prova multiple, programmi software per l'analisi dei dati, cartuccia a nastro magnetico
Generatore d'impulsi Cober Electronics, Inc. 7 Gleason Ave. Stamford, CT 06902 703-327-0003	605P	2,2 kV, potenza di picco 20 kW, impulsi da 0,3 μs a 10 μs, PRS variabile con possibilità di amplificazione di un segnale esterno
Generatore e monitor di transitori KeyTek Instrument 220 Grove St. Box 109 Waltham, MA 02154 617-272-5170	Sistema 1000, comprende il modello 424 ed il modello 711	6 kV, fino a 5000 A, possibilità di ampliamento, forme d'onda a scelta (8/20, 10/1000, eccetera). Misura e visualizza le tensioni e le correnti di picco applicate al componente in prova. Puntale ad alta tensione differenziale polarizzato al picco. Prove secondo IEEE.
Generatore d'impulsi Velonex Varian Div. 560 Robert Ave. Santa Clara, CA 95050 408-727-7370	360	2,5 kV, 10 A, impulsi di durata fino a 300 μs, PRF variabile, fronti di salita e discesa variabili, elementi inseribili per l'aumento della corrente di picco.

* L'inclusione di un fabbricante in questo elenco non costituisce un avvallo, e l'esclusione non implica alcun giudizio negativo.

TABELLA 7.3 - APPARECCHIATURE DI RIVELAZIONE DEI TRANSITORI*

FABBRICANTE	MODELLO	PRESTAZIONI
Oscilloscopi a memoria		
Tektronix P.O. Box 500 Beaverton, OR 97005	466 7834	100 MHz, velocità 3000 div/μs, portatile, memoria multimodo, 400 MHz, 5500 div/μs
Strumenti di registrazione dei picchi:		
Micro-Instrument	Voltmetro a memoria modello 5203	20 MHz, registrazioni, visualizza livelli di tensione fino a 2 kV
Bermar Box 1043 Nashua, NH 03061 603-888-1300	Voltmetro a memoria MVM - 108	Visualizza le tensioni di picco, impulsi di durata > 0,5 μs, a tensioni fino a 8 kV
Dranetz 2285 So. Clinton Ave. So. Plainfield, NJ 07080 201-287-3680	Modello 606	Stampa le tensioni di picco, durata impulsi > 0,5 μs
Key Tek Box 109 Waltham, MA 02154 617-272-5170	Generatore & monitor di transitori tipo 424	Visualizza le tensioni di picco, durata impulsi > 0,5 μs
Industronic 115 Pleasant St. Mellas, MA 02054 617-376-8146	Zap-Trap > 2 μs	Misura tensioni di picco, durata impulsi
Trott 9020 Wehrle Dr. Clarence, NY 14031 413-634-8500	TR745A	Rivela impulsi da 0,3 μs, fino a 3000 V

chiare l'ambiente elettromagnetico dei circuiti reali[7] che hanno bisogno di protezione contro i fenomeni transitori. Il Capitolo 1 ha presentato una panoramica degli ambienti soggetti ai transitori; in questo paragrafo ora si danno alcuni fondamenti supplementari che riguardano dei presupposti generalmente accettati circa questi ambienti.

7.7.1 Onde di prova

È stato proposto un certo numero di onde di prova, atte ad essere applicate a "scatole nere" elettroniche per dimostrare la possibilità di sopravvivenza o di funzionamento senza impedimenti nell'ambiente disturbante. La Tabella 7.4 è un elenco parziale di queste onde di prova, presentato per illustrare la grande varietà delle proposte, piuttosto che una lista completa.

TABELLA 7.4 - ELENCO PARZIALE DELLE ONDE DI PROVA ESISTENTI O PROPOSTI

ORIGINE	DESCRIZIONE		APPLICAZIONE CONSUETA
	FORME D'ONDA	AMPIEZZA	
ANSI, IEC	• 1,2 / 50 μs • 8,0 / 20 μs	prescritta in tens. prescritta in corr.	apparati di potenza
IEEE Std. 472 Guida per la capacità di resistenza ai transistori (SWC)	• 1,25 MHz ripetitiva a 60 Hz • 6 μs per diminuire al 50% • Impedenza di sorgente 150 Ω	2,5 kV di picco	Circuiti in alternata a bassa tensione e linee di controllo nelle apparecchiature di sottostazione
Norme IEEE 587-1981 Guida alle tensioni transitorie nei sistemi di distribuzione elettrica in c.a. a bassa tensione	• 0,5 μs-100 kHz • In tensione: 1,2/50 μs • In corrente: 8/20 μs	Dipendente dalla collocazione	Circuiti in c.a. a bassa tensione e linee di segnale
Interruttori di scarica a massa	• Fronte di salita 0,5 μs • Oscillazioni smorzate 100 kHz • Secondo picco >= 60% del primo • Impedenza di generatore 50 ohm	3 kV e 6 kV	Circuito ad alta impedenza degli interruttori di scarica a massa
IEEE Std.465.1 Specifiche di prova per scaricatori a gas	Tre requisiti: • Corrente 10 / 1000 μs • Corrente 8 / 20 μs • rampa di tensione lineare di 100,500, 5000,10.000 V/μs fino alla scarica	da 50 a 500 A da 5 a 20 kA	protettori telefonici
FCC Docket 19528	• Metallico — 10 / 560 μs — 100 A corrente di cortocircuito • Longitudinale — 10 / 160 μs — 200 A corrente di cortocircuito	Apparecchiature per 800 V picco 1500 V picco	telecomunicazioni
FCC sezione 68.302, Titolo 47 Telecomunicazioni	• 2 / 10 μs — Possibilità di cortocircuito a 1000 A	2500 V picco	Apparecchiature di comunicazione alimentate dalla rete
Rural Electrification Administration Spec. PE-60	• Tensione 10 / 1000 μs • Salita 100V/μs	3σ del livello del protettore	Elettronica telefonica
Impulso elettromagnetico nucleare (NEMP)	• Impulso rettangolare da 3 ns a 10 μs • Onda sinusoidale smorzata, da 10^1 a 10^3 Hz	da 0,1 a 1000A da 1.0 a 100 A	valutazione dei componenti

(continua)

TABELLA 7.4 - (Continua)

ORIGINE	DESCRIZIONE		APPLICAZIONE CONSUETA
	FORME D'ONDA	AMPIEZZA	
Navetta spaziale NASA	• Onda sinusoidale smorzata a 125 kHz • Unidirezionale 2 / 100 μs —300 / 600 μs	Eoc - 50V Isc - 10A Eoc - 50V Isc -10A Eoc - 0,5V Isc - 5A	apparecchiature elettroniche per la navetta spaziale
MIL-STD-704	• Inviluppo prescritto, durata massima 50 μs	600 V di picco	Alimentazione su aerei militari

I varistori GE-MOV II sono disponibili in una serie di alta affidabilità. Questa serie è soggetta alla maggior parte delle prove di sollecitazione meccanica ed ambientale, compreso il collaudo al 100%, ed il condizionamento di processo, sempre al 100%. Maggiori particolari si troveranno nel capitolo 9. (751).

È stata anche fatta la proposta di incoraggiare un concetto di livello di controllo,[5] secondo il quale poche e selezionate onde di prova potrebbero essere scelte con l'accordo contemporaneo di produttori e consumatori. Il proposito sarebbe di stabilire con queste onde alcuni criteri per giudicare le prestazioni dei circuiti elettronici senza ricorrere alla proliferazione delle onde di prova, ciascuna destinata a simulare un determinato ambiente.

7.7.2 L'impedenza di generatore

L'impedenza effettiva del circuito che introduce il transitorio è un parametro di enorme importanza nel progetto di uno schema di protezione. L'impedenza definisce i requisiti di energia e di corrente assorbita del componente impiegato per la protezione.

Una volta, la verifica della resistenza ai transitori di un dispositivo si faceva applicando un'onda di tensione all'apparecchio e controllando che in esso non si verificassero scariche. Di norma il dispositivo presentava all'impulso un'impedenza elevata, e quindi non si aveva un passaggio apprezzabile di corrente (a meno che non si verificasse una scarica) e l'impedenza del generatore non aveva importanza. Ma con l'applicazione di un soppressore di transitori, specie se del tipo ad assorbimento di energia, l'energia del transitorio si ripartisce tra il soppressore ed il resto del circuito, il quale potrà essere definito come il "generatore". Come nel caso delle forme d'onda, sono state fatte parecchie proposte di unificazione delle impedenze di generatore.

L'elenco che segue riassume le diverse proposte destinate alle linee di distribuzione in corrente alternata:

1. Lo standard SWC (Surge Withstand Capability = capacità di resistenza ai picchi impulsivi) prescrive un generatore a 150 Ω.

2. Il generatore standard secondo la UL-GFCI (Ground Fault = massa accidentale) è di 50 Ω[11].

3. Le proposte TCL (Transient Control Level = Livello di controllo dei transitori) secondo Martzloff ed altri[7] prevedono una resistenza da 50 Ω in parallelo con un'induttanza da 50 μH.

4. Il concetto di categoria d'installazione delle norme IEEE 587-1980 implica una gamma di impedenze da 1 a 50 ohm quando la collocazione passa dall'interno all'esterno.

5. Le prescrizioni FCC per apparechiature di telecomunicazione collegate alla linea implica un'impedenza di generatore di 2,5 ohm. Le norme FCC tendono però ad assicurare una "bruciatura" permanente di una perforazione del dielettrico e non implicano necessariamente che l'effettiva impedenza di generatore nel circuito reale sia proprio di 2,5 ohm.

6. Non esistono accordi riguardanti le suddette propote di una specifica impedenza di generatore. Esaminando con maggiore precisione i diversi punti, si potrà osservare che esiste una variabilità tra 2,5 e circa 50 ohm. Tornando alle norme IEEE 587, usando per le diverse categorie di collocazione la OCV (tensione a circuito aperto) e la SCI (corrente di cortocircuito), si potrà calcolare l'impedenza del generatore.

Qualsiasi circuito di distribuzione avrà in pratica sempre una certa impedenza finita dovuta alla resistenza ed all'induttanza della linea e del trasformatore di distribuzione. La Figura 7.15 mostra gli andamenti dell'impedenza tra linea e terra in impianti di distribuzione a 120 ed a 220 V caratteristici di sistemi residenziali.

L'impedenza dei sistemi industriali e commerciali, che derivano in genere da attacchi sotterranei, o da sottostazioni separate capaci di erogare una potenza in kVA relativamente alta, tende ad essere bassa, e l'iniezione di un qualsiasi transitorio da fulmine avviene in punti parecchio distanti. Questo ha come risultato dei picchi transitori di minore ampiezza rispetto a quelli che ci si può attendere negli impianti residenziali, ma l'energia implicata può essere maggiore. Quindi i soppressori di transitori destinati all'uso industriale devono avere una maggiore dissipazione energetica rispetto a quelli previsti per impianti a prese domestiche.

È chiaro che le norme industriali non sono state capaci di raggiungere un accordo su un valore unificato dell'impedenza di generatore, e questo per una quantità di motivi.

Quando, per una certa applicazione, si sceglie un soppressore di transitori ci sarà bisogno di un giudizio tecnico basato sulla conoscenza del funzionamento e delle possibilità del componente.

IMPULSI AD ONDA SMORZATA DI CATEGORIA A	6 kV/200 A = 30 ohm
IMPULSI DI CATEGORIA A	10 kV/10 kA = 1 ohm
IMPULSI AD ONDA SMORZATA DI CATEGORIA B	6 kV/500 A = 12 ohm
IMPULSI DI CATEGORIA B	6 kV/3 kA = 2 ohm

Figura 7.15 - Impedenze di generatore per le diverse categorie di collocazione, per i sistemi in c.a. a bassa tensione (fino a 600 V).

BIBLIOGRAFIA

1. Fisher, F.A., "Overshoot - A Lead Effect in Varistor Characteristics", Report 78CRD, General Electric, Schenectady, N.Y., 1978.
2. Heller, B. and A. Veverka, *Surge Phenomena in Electrical Machine,* ILIFFE Books Ltd., London, 1968.
3. Greenwood, Allen, Electrical Transients in Power Systems, Wiley Interscience, New York, 1971.
4. Craggs, J.D. and J.M. Meek, *High Voltage Laboratory Techniques,* Buttersworth Scientific Pubblications, London, 1954.
5. Martzloff, F.D., *"Transient Control Level Test Generators,"* Report 77CRD241, General Electric, Schenectady, N.Y., 1977.
6. Test Specifications for Varistor Surge-Protective Devices, IEEE Std. C62.33, 1982.
7. Martzloff, F.D., and F.A. Fisher, "Transient Control Level Philosophy and Implementation - The Reasoning Behind the Philosopy", 77CH1224-5EMC, Proceedings of the 2nd Symposium on EMC, Montreux, June 1977.
8. *"Standard for Safety: Ground Fault Circuit Interrupters,"* UL943, Underwriters Laboratories, May 12, 1976.
9. "Longitudinal Voltage Surge Test # 3", Code of Federal Regulations, Section 68.302(e), Title 47, Telecommunications.

CAPITOLO 8

L'AFFIDABILITA' DEI VARISTORI

8.1 INTRODUZIONE

Il varistor GE-MOV® II è un soppressore di transitori di tensione robusto, affidabile e progettato per migliorare la sicurezza di funzionamento dei sistemi elettronici. Un'adatta progettazione che faccia uso di varistori GE-MOV®, II come descritto in altre parti di questo manuale, limiterà le tensioni di transitorio a livelli compatibili con la lunga durata del sistema elettronico. Per accertarsi che il varistor GE-MOV® II svolga correttamente la sua funzione, la General Electric sottopone a stretto controllo il processo di fabbricazione e la qualità del prodotto. Questo risultato si ottiene per mezzo di una combinazione di controlli periodici al 100% e di controlli su lotti prelevati in produzione. Si controllano in questa maniera sia i parametri che le caratteristiche di affidabilità.

Ogni anno si accumulano più di 1,7 milioni di componenti-ore di funzionamento alle prestazioni massime e di prove di durata accelerata. Inoltre esiste un programma di ricerca rivolto al miglioramento continuo del prodotto in modo da ottimizzare quanto si consegna al cliente. Come risultato di questi programmi si sono ottenuti una quantità grandissima di dati riguardanti l'affidabilità, nonché alcuni modelli per prevederla.

In questo momento si stanno producendo due tipi di varistori GE-MOV® II: un tipo a "tensione di rete" (superiore a 100 V eff.) ed un tipo a "bassa tensione" (inferiore a 100 V eff). La valutazione dell'affidabilità è stata fatta su entrambi i tipi alle condizioni della seguente tabella:

Condizioni della prova	**Sollecitazione**
Tensione	polarizzazione c.a. potenza c.c.
Temperatura	100°C 125°C 145°C
Energia	ad impulsi
Stoccaggio	125°C
Umidità	40°C, 95% um.rel.
Prove meccaniche	saldabilità, robustezza dei terminali, urti, vibrazioni

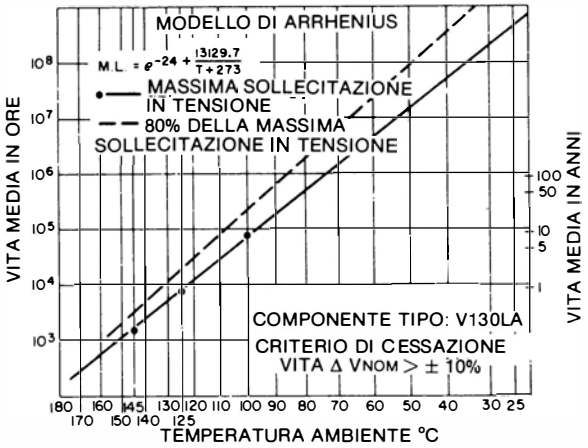
Con il miglioramento del prodotto e con l'evoluzione dei processi di fabbricazione e delle procedure di prova cambia l'applicabilità dei precedenti dati di valutazione dell'affidabilità. Di conseguenza i dati presentati in questo capitolo rappresentano una "visione istantanea" dei dati che si possono applicare ai varistori GE-MOV® II fabbricati ora e nell'immediato futuro. I dati di prova hanno avuto origine da altissimi livelli di sollecitazione, alle prestazioni nominali od anche maggiori per avere la certezza che il prodotto sia in grado di assolvere quei compiti e per ottenere la massima quantità di informazioni nel più breve tempo possibile. I risultati delle prove con polarizzazione in tensione alternata e in potenza continua hanno permesso di produrre dei modelli che anticipano la durata della vita utile in funzione della sollecitazione applicata.

8.2 AFFIDABILITA' CON POLARIZZAZIONE IN TENSIONE ALTERNATA

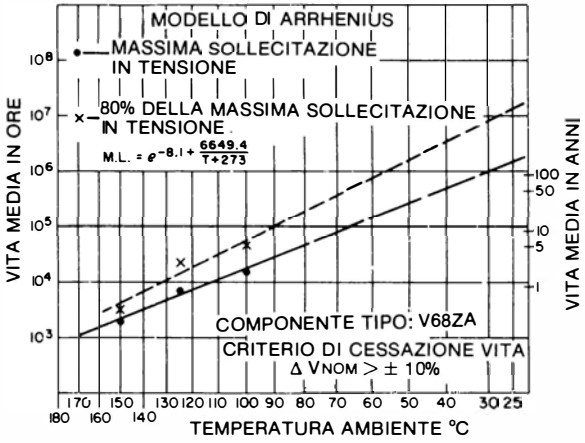
La maggioranza delle applicazioni dei varistori GE-MOV® II si ha nella soppressione dei transitori sulle linee di distribuzione in c.a. Il varistor viene collegato in parallelo alla tensione alternata di linea ed è polarizzato da una tensione sinusoidale di ampiezza costante. Se la corrente del varistor aumenta con il passare del tempo, aumenterà anche la dissipazione di potenza, con la possibilità di avere alla fine un collasso termico e la distruzione del varistor. A causa di questa possibilità è stata eseguita una serie di prove estensive progettate su base statistica allo scopo di determinare l'affidabilità del varistor sottoposto a polarizzazione alternata ed a sollecitazione termica contemporanee. Questa serie di prove ha richiesto oltre 1 milione di ore-componente di funzionamento a temperature superiori a 145°C. La durata media delle prove varia da 7000 ore alle basse sollecitazioni fino a 495 ore alle sollecitazioni più elevate. I risultati di queste prove hanno dimostrato che il varistor GE-MOV® II si approssima in modo egregio al modello di Arrhenius, ossia la vita utile prevista è in relazione logaritmica con il reciproco della temperatura assoluta ($MTBF = e^{c+K/T}$). La definizione di deterioramento si basa su una variazione della V_N superiore al $\pm$ 10%. Per quanto il varistor possa ancora funzionare normalmente con questa variazione, i componenti a bassissima tolleranza della V_N cominceranno a dissipare più potenza. Come chiarito in precedenza questo potrebbe a lungo andare portare ad un guasto. Questa scelta della definizione di deterioramento insieme alle minori sollecitazioni che si hanno nell'effettiva applicazione, forniranno delle stime della vita utile sufficienti alla maggioranza dei progetti. La Figura 8.1 illustra la curva secondo il modello di Arrhenius per i varistori a tensione di linea e per quelli a bassa tensione.

Questo tipo di modello statistico permette una previsione del livello di affidabilità che si può attendere alle normali temperature di funzionamento. Le consuete temperature ambiente sono molto inferiori ai livelli di temperatura scelti per le prove accelerate. Per esempio, un V130LA 10 che funzioni a 130 V c.a. in ambiente a 55°C ha una vita media, ricavata dalla Figura 8.1(a), di circa 10 milioni di ore (corrispondenti a circa 1140 anni!). L'uso dell'equazione fornisce una stima più

precisa di 9.152.824 ore (1045 anni). Si noti che, a tensioni di polarizzazione inferiori, si può prevedere una durata media ancora maggiore. Per quanto siano descritti specificatamente i componenti del tipo V130LA e V68ZA, i risultati si possono estendere a tutti i varistori GE-MOV® II. Un'ulteriore evidenza del dimensionamento prudenziale dei varistori GE-MOV® II è data dall'assenza di guasti in esercizio sistematici o ripetuti negli oltre 7 anni di impiego del prodotto. Tutti i guasti in esercizio dei varistori GE-MOV® II sono stati causati finora da applicazione non corretta o da superamento della possibilità di dissipazione energetica del componente.



(a) Varistor GE-MOV® II a tensione di rete



(b) Varistor GE-MOV® II a bassa tensione

Figura 8.1 - Modelli di Arrhenius della vita media dei varistori rispetto alla temperatura.

Si può notare che le curve di vita media hanno una pendenza molto ripida. Questo dimostra un'elevata energia di attivazione. Quando la temperatura di funzionamento si abbassa, la vita media aumenta rapidamente. Anche quando la sollecitazione di tensione viene abbassata si ha un aumento della vita utile. La curva di massima sollecitazione rappresenta una condizione del tipo peggiore possibile di

STABILITA' A LUNGO TERMINE DEI VARISTORI GE-MOV®II A TEMPERATURA ELEVATA ED ALLA MASSIMA TENSIONE

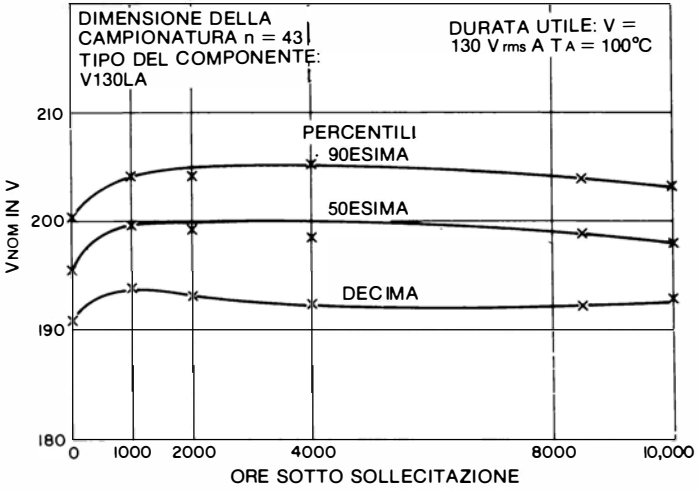


Figura 8.2 - Stabilità in tensione.

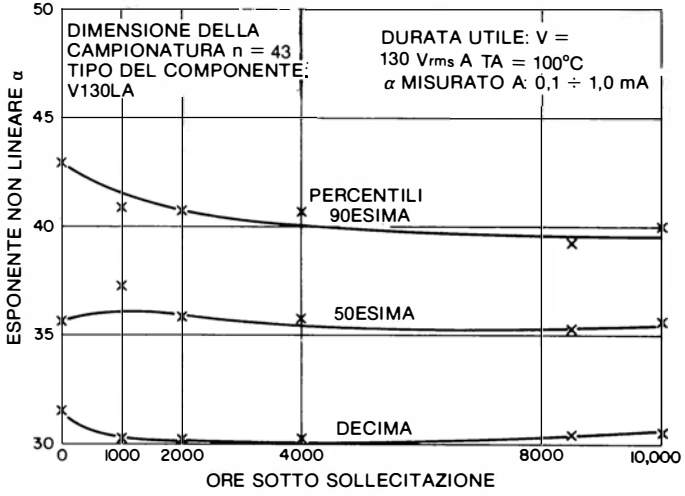


Figura 8.3 - Stabilità ad esponente non lineare.

un modello al limite inferiore della tensione nominale, che sia fatto funzionare alla massima tensione ammessa per quel tipo. Nella pratica consueta la media dei componenti funzionerà in prossimità della curva di sollecitazione all'80% della tensione.

Per alcune applicazioni occorrono al progettista di circuiti altre informazioni

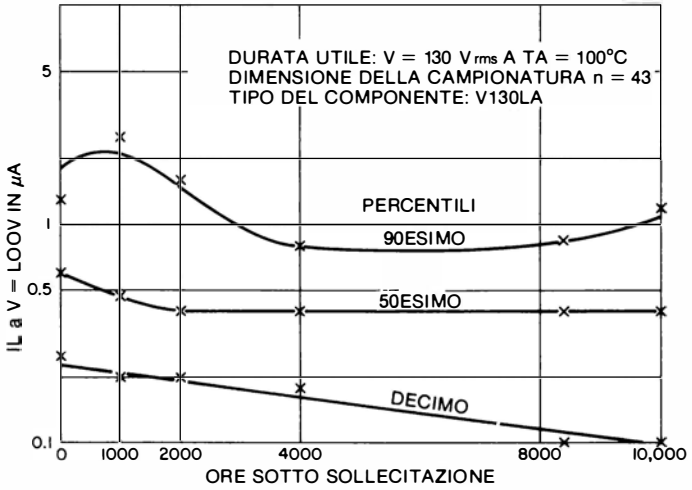


Figura 8.4 - Stabilità alla dispersione.

riguardanti la stabilità per valutare l'effetto del tempo sul funzionamento del circuito. Le Figure 8.2, 8.3 ed 8.4 illustrano la stabilità di altri parametri del varistor GE-MOV® II che funzioni alla massima tensione nominale ed a 100°C per 10.000 ore (circa 1,15 anni). Questi grafici indicano la risposta del decile superiore, medio ed inferiore, e forniscono pratiche informazioni di progetto riguardanti la stabilità della V_N, del consumo di potenza in assenza di sollecitazioni e dell'esponente non lineare (α).

8.3 AFFIDABILITA' CON POLARIZZAZIONE IN CONTINUA

I varistori GE-MOV® II vengono anche applicati in parallelo a linee di alimentazione in continua soggette ad impulsi transitori. Questa applicazione è più frequente per apparecchiature in bassa tensione. Il varistor è progettato per avere un'elevata affidabilità quando la tensione continua di polarizzazione è inferiore a V_N, la corrente è dell'ordine dei microampere e l'assorbimento di potenza media è piccolo. Questo funzionamento è analogo a quello in polarizzazione alternata.

I varistori possono funzionare in modo affidabile anche con dissipazioni di potenza dovute ad impulsi transitori intermittenti. Per questo tipo di servizio si forniscono i valori nelle caratteristiche tecniche. Il funzionamento non è caratterizzato da una *dissipazione continua di potenza* dato che l'applicazione in regime transitorio non richiede in genere questa capacità. La sollecitazione a dissipazione continua di potenza può essere gravosa e se ne mostreranno gli effetti in seguito per fornire una guida al progettista.

8.3.1 Prove con polarizzazione in tensione continua

L'applicazione di una tensione continua costante, inferiore a quella nominale ad un varistor, GE-MOV® II costituisce una sollecitazione debole. È necessario un alto grado di stabilità, analogo a quello che si ha con la polarizzazione in alternata, in quanto esiste anche in questo caso il pericolo dell'aumento della dissipazione con il passare del tempo. Si sono effettuate delle prove di durata accelerate sui varistori polarizzati in tensione continua costante. Le misure indicano che la stabilità è almeno analoga ai risultati ottenuti nelle prove in c.a. I dati sono rappresentati in Figura 8.5.

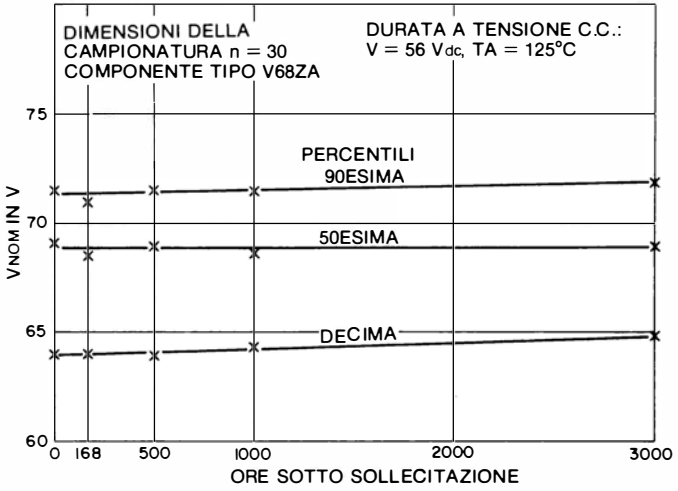


Figura 8.5 - Durata di vita accelerata con tensione c.c..

Anche in questa prova il criterio di deterioramento è segnato da una variazione di ± 10% nella V_N. Nessun componente è arrivato a questo limite durante la prova accelerata di 3000 ore. Si deve notare che la polarità di lettura del parametro è la stessa della sollecitazione.

8.3.2 Prove di potenza in c.c.

L'applicazione di una corrente costante al varistor provoca una condizione di potenza pressoché costante. Si può quindi organizzare con facilità una prova di vita e potenza costante, usando una resistenza di limitazione della corrente ed un generatore di tensione che ne fornisca una circa doppia della V_N. A livelli di potenza notevoli in confronto a quelli nominali, la polarizzazione del varistor supera V_N (di solito 1 mA). Il comportamento a lungo termine è caratterizzato da un continuo aumento della corrente dispersa, avvertibile specialmente alle basse tensioni. Questo fenomeno è illustrato in Figura 8.6. La prova è classificabile tra quelle a sollecitazione elevata, se paragoniamo queste condizioni ai normali livelli di funzionamento. Il cambiamento della corrente dispersa provoca una graduale diminuzione di V_N con il passare del tempo. Questo si può vedere nelle Figure 8.7 ed 8.9, che mostrano l'andamento di V_N rispetto al tempo.

La risposta riguardante la vita utile in regime di potenza può essere messa in una diversa prospettiva analizzando una serie di prove accelerate ad alta temperatura. Queste prove sono state condotte su tipi di varistor a bassa tensione che furono

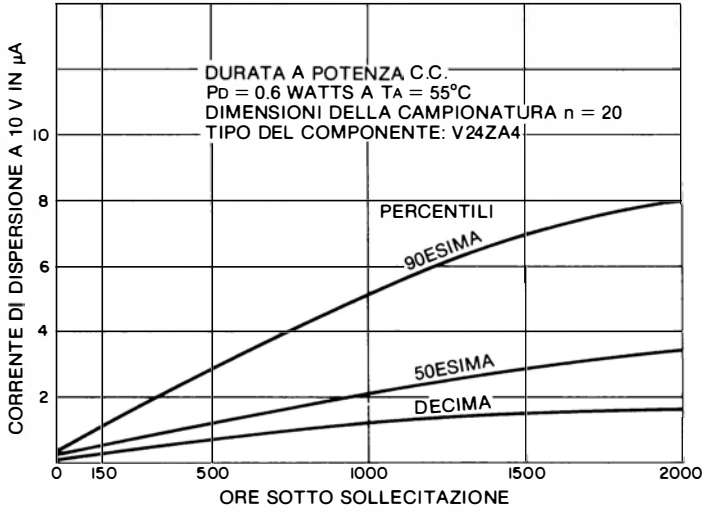
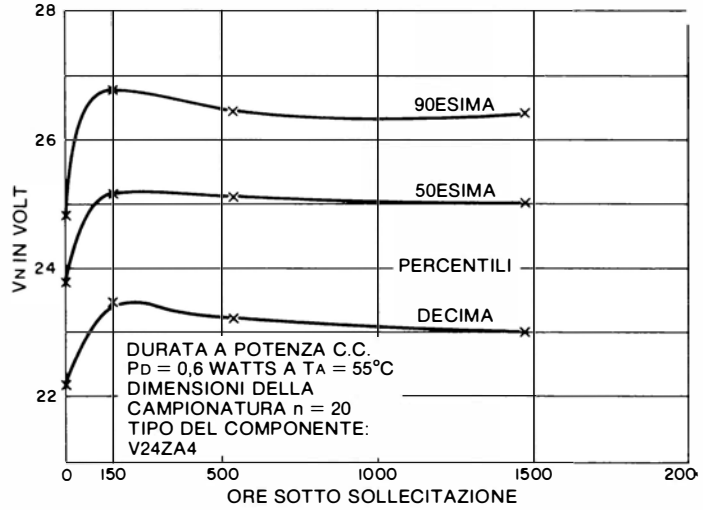
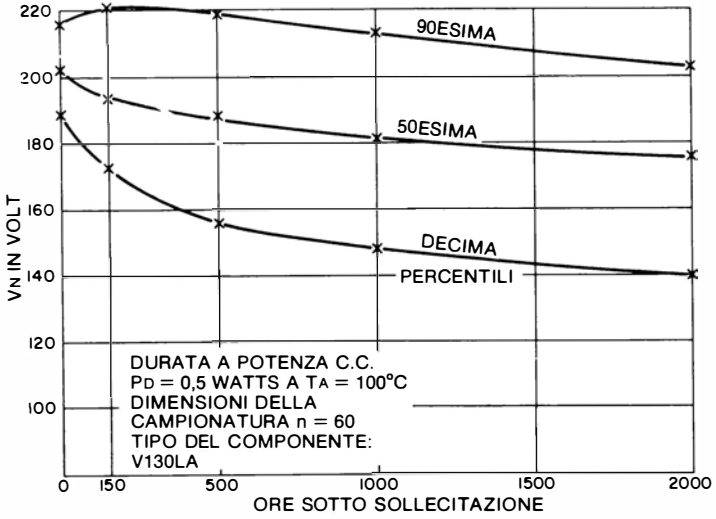


Figura 8.6 - Durata accelerata a potenza c.c.. Variazione della corrente di dispersione per varistori a bassa tensione.

sottoposti a sollecitazioni termiche di 55°C, 100°C, 125°C e 145°C. Come indicatore di degradazione ad elevata sensibilità è stato scelto il cambiamento della corrente di perdita a bassa tensione, e questo cambiamento è stato tracciato in funzione del tempo. La fine della vita utile del componente è stata posta ad un limite della



(a) Varistor a bassa tensione



(b) Varistor a tensione di rete

Figura 8.7 - Durata accelerata a potenza c.c., variazione della V_N.

corrente di perdita di 100 μA. I risultati medi si adattavano bene al modello di Arrhenius, come si vede in Figura 8.8. L'autoriscaldamento provocato dalla dissipazione di potenza nel componente si aggiungeva nella prova alla temperatura ambiente. Questo modello di Arrhenius può essere usato per prevedere la vita utile alle normali temperature di funzionamento, mediante estrapolazione dalla curva.

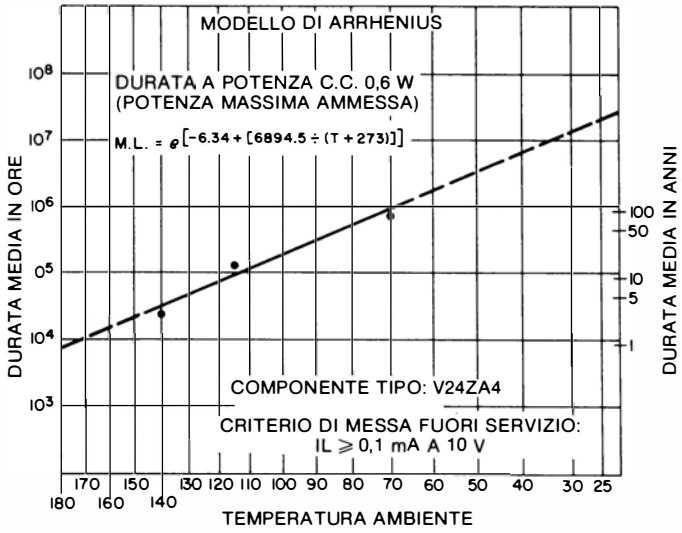


Figura 8.8 - Modello di affidabilità per la durata a potenza c.c..

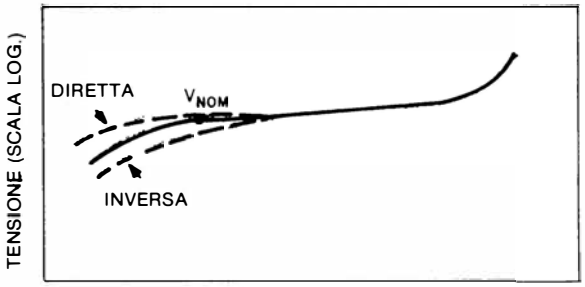
Per esempio, con una temperatura ambiente di funzionamento di 55°C, si può prevedere una vita utile media di 2.400.000 ore (271 anni) in esercizio continuo.

Con una giudiziosa diminuzione della potenza ad un livello modesto, il varistor può essere usato in dissipazione continua di potenza in una linea a c.c. Queste applicazioni sono poco diffuse e molto specializzate, in quanto il componente è principalmente destinato al servizio intermittente in regime transitorio.

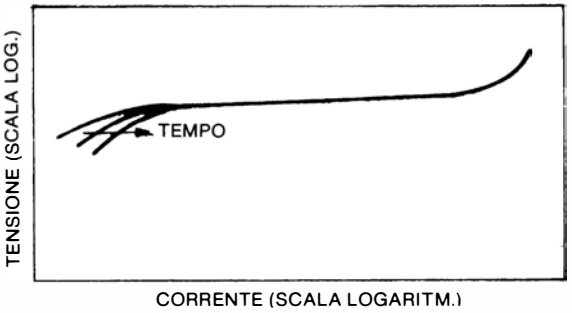
8.4 COMPORTAMENTO DI FRONTE ALL'ENERGIA IMPULSIVA

La capacità del varistor GE-MOV® II di assorbire grandi quantità di energia impulsiva è la principale ragione della sua utilizzazione. Nessun altro dispositivo di soppressione dimostra prestazioni analoghe combinate con lo stesso vantaggio economico. L'effetto della sollecitazione impulsiva è di spostare il margine inferiore di corrente nella caratteristica V-I, come si vede nella Figura 8.9. Con una sufficiente sollecitazione (unipolare), la curva diventa asimmetrica, come si vede in Figura 8.9(a). Anche altre forme di sollecitazione elettrica o termica hanno effetto sulla regione delle basse correnti. La risposta più normale alla maggior parte delle sollecitazioni è uno spostamento verso destra del segmento a bassa corrente della caratteristica V-I. Questo è il motivo principale che giustifica l'uso comune della definizione di deterioramento come cambiamento della V_N del ± 10%.

Alle tensioni superiori a V_N, si è osservato un leggero cambiamento nella risposta agli impulsi, come pure ad altre forme di sollecitazione. Dopo essere stato sottopo-

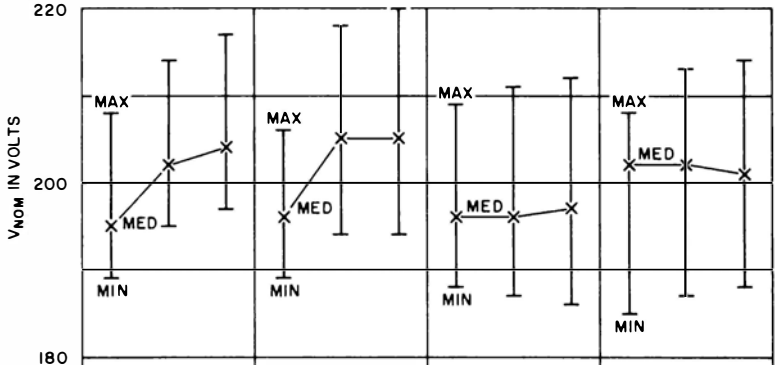


(a) Risposta all'impulso unidirezionale ed alla sollecitazione in c.c.



(b) Risposta generale alle sollecitazioni rispetto al tempo.

Figura 8.9 - Effetti delle sollecitazioni sulla caratteristica V-I con il passare del tempo.



N° IMPULSI	0	10	50	0	100	200	0	1	10	0	1	10
AMP. DI PICCO	25A			500A			2000A			2000A		
TEMPERATURA	25°C			25°C			25°C			75°C		
DURATA IMPULSO (μ s)	10 × 1000			8 × 20			8 × 20			8 × 20		

Figura 8.10 - Tipica prova di stabilità agli impulsi, modello V130LA20A.

sto alla sollecitazione, il varistor continuerà a fornire un'adeguata protezione limitando ancora la tensione fino al momento in cui ne avverrà la distruzione catastrofica. A questo punto il componente manifesterà una perforazione che lo manderà in cortocircuito. Per causare questo tipo di guasto, che consiste nella fusione del corpo ceramico, occorre un impulso di altissima energia. Più spesso è la corrente alternata proveniente dalla linea a causare la distruzione termica del componente indebolito dalla permanenza in regime impulsivo.

In Figura 8.10 vengono riassunte, per il modello V130LA20A, la stabilità della tensione a varie condizioni della corrente di picco, della durata dell'impulso, e della temperatura. Questi risultati indicano chiaramente l'eccellente resistenza agli im-

7 mm

Corrente di picco	5A	100A	400A	400A	1000A
Temperatura	25°C	25°C	25°C	75°C	25°C
Forma d'onda	10 / 1000	8 / 20	8 / 20	8 / 20	8 / 20
N° impulsi	10 | 50	100 | 200	1 | 10**	1 | 10**	1
N° oggetti provati	10 | 10	10 | 10	10 | 10	10 | 10	10
N° guastati*	0	0	0	0	0

14 mm

Corrente di picco	25A	500A	2000A	2000A	4000A
Temperatura	25°C	25°C	25°C	75°C	25°C
Forma d'onda	10 / 1000	8 / 20	8 / 20	8 / 20	8 / 20
N° impulsi	10 | 50	100 | 200	1 | 10**	1 | 10**	1
N° oggetti provati	10 | 10	10 | 10	10 | 10	10 | 10	10
N° guastati*	0	0	0	0	0

20 mm

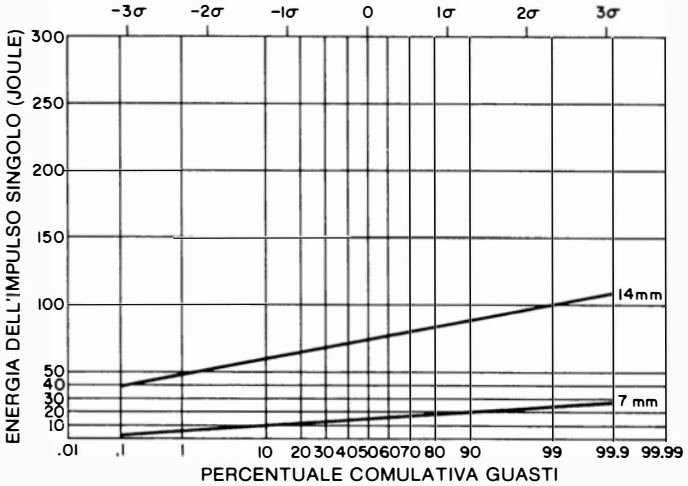
Corrente di picco	50A	1000A	4000A	4000A	6500A
Temperatura	25°C	25°C	25°C	75°C	25°C
Forma d'onda	10 / 1000	8 / 20	8 / 20	8 / 20	8 / 20
N° impulsi	10 | 50	1 | 10	1 | 10**	1 | 10**	1
N° oggetti provati	10 | 10	10 | 10	10 | 10	10 | 10	10
N° guastati*	0	0	0	0	0

* Definizione di guasto catastrofico.
** Vuol dire 5 volte il valore nominale.

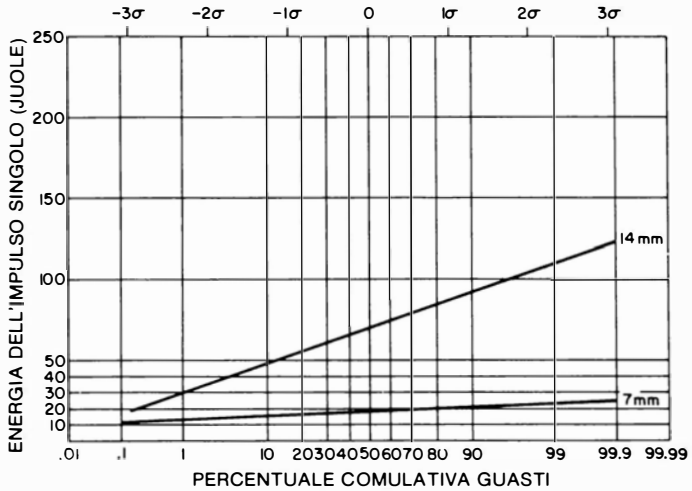
Figura 8.11 - Sommario della resistenza agli impulsi dei V130LA.

pulsi osservata in tutti i componenti. Tra le prove a 25°C e quelle a 75°C non si sono osservate differenze apprezzabili.

La Figura 8.11 fornisce ulteriori particolari riguardanti la sopportazione delle correnti impulsive dei modelli a tensione di rete con forma d'impulso esponenziale



(a) Varistor a bassa tensione (tipo V68ZA)

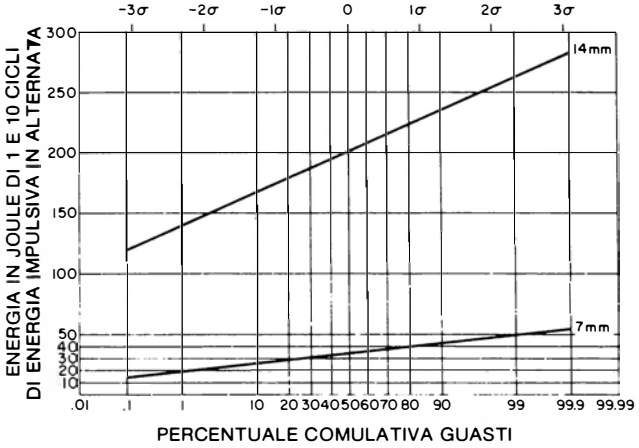


(b) Varistor a tensione di rete (tipo V130LA)

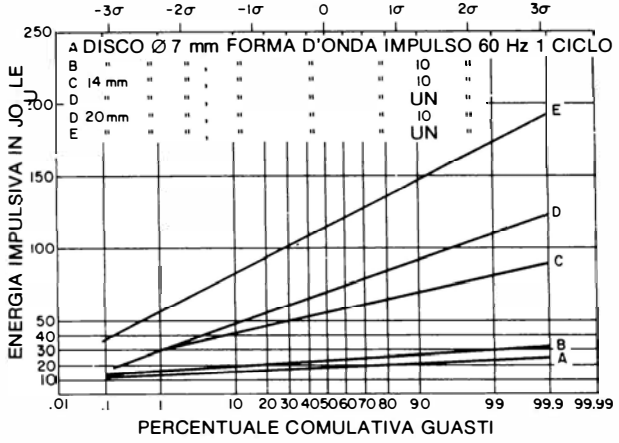
Figura 8.12 - Resistenza all'energia impulsiva per impulso singolo da 8 x 20 μs.

(fare riferimento alla Figura 3.18). Questa tabella indica le possibilità di sopravvivenza dei componenti sottoposti ad alti livelli di corrente, con impulsi nel limite nominale o superiori a questo.

In Figura 8.12 si presentano dei dati riguardanti la capacità di sopportare la



(a) Varistor a bassa tensione (tipo V68ZA)



(b) Varistor a tensione di rete (Tipo V130LA).

Figura 8.13 - Resistenza all'energia transitoria a 60 Hz.

dissipazione di energia dei varistori a bassa tensione (tipi V68ZA) e di quelli a tensione di rete (tipi V130LA). Queste curve mostrano una previsione statistica della distribuzione delle avarie in rapporto all'energia degli impulsi. Le distribuzioni sono rappresentate su un normale grafico probabilistico, dal quale si potranno ricavare le quantità percentuali stimate delle avarie. Il metodo di prova ad impulsi adopera un generatore di quasi-corrente per applicare un impulso singolo di sollecitazione energetica dalla durata di 8 / 20 μs, dopo il quale viene applicata la tensione nominale in permanenza, 130 V eff. per i componenti a tensione di rete, e 40 V eff per quelli a bassa tensione. La distribuzione catastrofica avviene con perforazione distruttiva del corpo in ceramica, dopo la sollecitazione impulsiva e durante l'applicazione della tensione nominale. Ne consegue che la causa immediata si può ricercare nella deriva termica alla tensione nominale, provocata a sua volta dal surriscaldamento conseguente all'assorbimento dell'energia dell'impulso. Un esame effettuato dopo la prova sui componenti indenni, non ha dimostrato una degradazione apprezzabile delle caratteristiche V-I.

Le curve di distribuzione riflettono il carattere conservativo delle prestazioni energetiche del varistor GE-MOV® II. Per fare un esempio, i componenti da 7 e da 14 mm per tensione di rete (tipi V130LA) dissipano rispettivamente 8 J e 30 J nominali. La Figura 8.12 mostra una valutazione statistica a quei livelli energetici che provocano la distruzione di non più dell'1% dei campioni esaminati.

È stata anche fatta una prova per energia impulsiva con frequenza di rete di 60 Hz, con durata di impulso di un ciclo o di 10 cicli. Questa prova simula le condizioni di esercizio nelle applicazioni su linee di distribuzione in alternata, specie nei circuiti a crowbar, e quando sono usati insieme a scaricatori a scintilla per migliorare l'interruzione. In queste prove l'applicazione dell'energia impulsiva è immediatamente seguita dall'applicazione della tensione alternata massima nominale. I risultati sono presentati su un grafico probabililistico normale come distribuzione dell'energia rispetto alla percentuale di avarie. La Figura 8.13 illustra il comportamento dei varistori a bassa tensione ed a tensione di rete.

8.5 AFFIDABILITA' ED INTEGRITA' MECCANICA

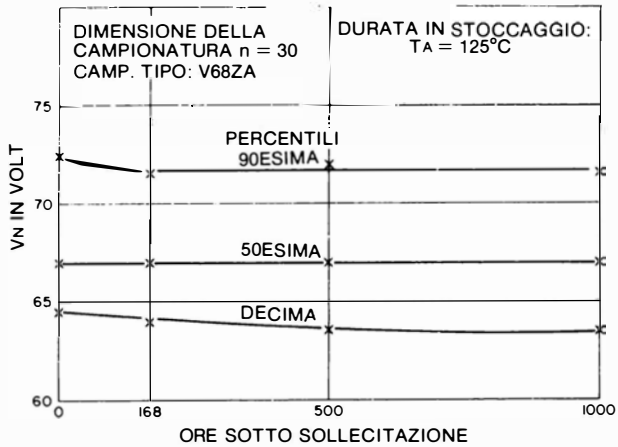
Il varistor GE-MOV® II è costruito incapsulando un pezzo massiccio di ceramica in un rivestimento plastico molto robusto. Questa costruzione robusta illustra ancora la filosofia prudenziale usata nella progettazione, quando si tratta di resistere alle prove meccaniche per l'approvazione militare. Nella Figura 8.14 appare una tabella delle prove eseguite con i risultati ottenuti nella normalità dei casi. Non si sono notate differenze apprezzabili tra componenti assiali o radiali, e tra componenti a bassa tensione ed a tensione di rete. Si deve anche notare che il rivestimento plastico è ignifugo per adempiere alle prescrizioni degli Underwriter Laboratories (UL 492)

PROVA MILITARE	METODO	CONDIZIONI	RISULTATI GUASTI/CAMPIONE	
			TIPO DEL CONTENITORE	
			RADIALE	ASSIALE
Saldabilità	MIL-STD-750 Metodo 2026.2	230°C, 5 sec. Immersione in umidità al 95%	0/15	0/25
Resistenza dei terminali	MIL-STD-750 Metodo 2036.3	3 piegature, arco a 90°C, peso di 8 once	0/15	0/25
Urto termico	MIL-STD-202E Metodo 107D	Da -55°C ad 85°C, 5 cicli	0/25	0/25
Urto meccanico	MIL-STD-750 Metodo 2016.2	1.500 g, 5 cadute, X_1, Y_1, Z_1	0/50	0/25
Vibrazione a frequenza variabile	MIL-STD-750 Metodo 2056	20 g, 100-2000 Hz, X_1, Y_1, Z_1	0/50	0/69

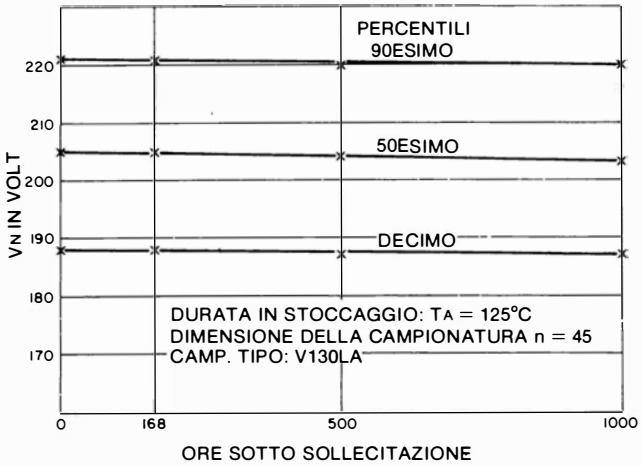
Figura 8.14 - Risultati delle prove meccaniche sugli incapsulaggi dei varistori GE-MOV® II.

8.6 AFFIDABILITA' AMBIENTALE E MAGAZZINAGGIO

La costruzione del varistor GE-MOV® II assicura la stabilità delle caratteristiche in una grande varietà di condizioni ambientali di magazzinaggio, trasporto e funzionamento delle apparecchiature elettroniche. Le prove condotte sui varistori



(a) Varistori a bassa tensione

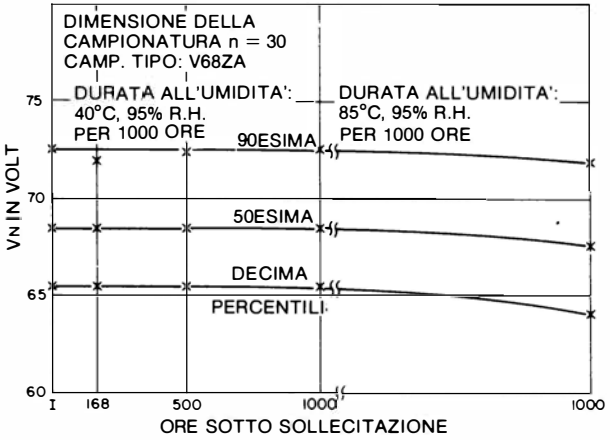


(b) Varistori a tensione di rete

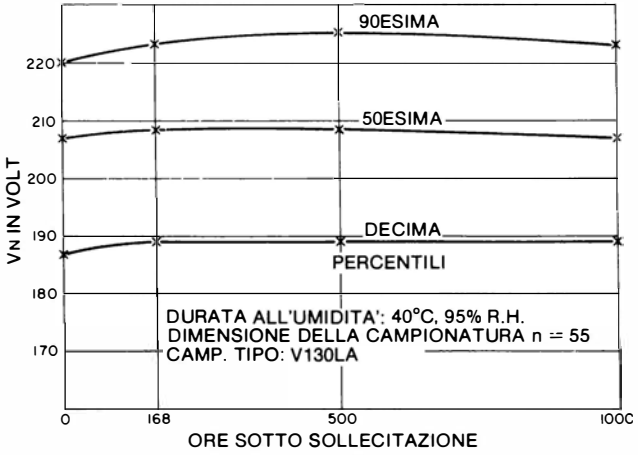
Figura 8.15 - Durata accelerata a magazzino.

GE-MOV® II confermano la stabilità dei componenti a bassa tensione ed a tensione di rete, soggetti a magazzinaggio ad alta temperatura, con sollecitazioni accelerate all'umidità. La Figura 8.15 mostra i dati di stabilità per prova accelerata di durata di 1000 ore di magazzinaggio a 125°C.

La Figura 8.16 mostra la stabilità alla prova intensiva di umidità. Si noti che i tipi



(a) Varistori a bassa tensione



(b) Varistori a tensione di rete

Figura 8.16 - Prova di durata accelerata all'umidità.

di varistor a bassa tensione hanno subito due prove consecutive. La prova normale di 1000 ore a 40°C e 95% di umidità relativa, è stata seguita dalla pesantissima prova ad 85°C e 95% di U. R. Dopo questa combinazione di prove è stata ancora osservata un'eccellente stabilità.

8.7 SICUREZZA

Il varistor GE-MOV® II può essere usato in sistemi che comportano rischi per la sicurezza del personale o delle apparecchiature. Tutti i componenti incluso questo dispositivo a semiconduttore, hanno la possibilità di guastarsi o di degradarsi in modo da non poter far più fronte al corretto funzionamento di tali sistemi. Sono disponibili ben note tecniche circuitali atte alla protezione contro simili evenienze. Esempi di queste tecniche comprendono la sistemazione di fusibili e l'autodiagnosi. Si raccomanda l'analisi dei guasti in tutti quei sistemi dove la sicurezza è di rigore. In questo capitolo sono state discusse le reazioni potenziali di un componente a diversi fattori ambientali. In tutti i progetti di circuiti si dovranno analizzare tutti quei fattori ed altri ancora.

Se il varistor avrà la probabilità di essere sottoposto a correnti impulsive ed a livelli di energia superiori alle sue prestazioni nominali, esso potrà subire la distribuzione fisica per rottura dell'involucro ed espulsione di materiale. È opportuno usare una protezione a fusibile, come detto nel Capitolo 4. Se non è protetto da un fusibile, il varistor deve essere montato lontano dagli altri componenti, oppure dovrà essere provvisto di schermo meccanico di protezione.

I varistori GE-MOV® II hanno ricevuto l'iscrizione in una norma dell'Underwriters Laboratories Inc., riguardante componenti da mettere in parallelo alle linee elettriche di distribuzione. "I soppressori di tensioni transitorie" categoria UL E75961.

Se l'analisi del sistema indica che c'é bisogno di u n grado massimo di affidabilità, si consiglia di mettersi in contatto con la General Electric per stabilire un programma di affidabilità a misura del cliente.

È stato messo in rilievo che la maggior parte delle prove sui parametri dei varistori e sulla loro affidabilità richiede l'impiego di tensioni di valore pericoloso. Quando siano previste delle prove sui varistori GE-MOV® II, bisogna prendere dei provvedimenti atti a garantire l'incolumità del personale.

CAPITOLO 9

VARISTORI AD OSSIDO METALLICO GE-MOV® II PER LA PROTEZIONE CONTRO I TRANSITORI: CARATTERISTICHE TECNICHE

GE-MOV® II è il prodotto più recente della tecnologia dei varistori ad ossido metallico; essi offrono una capacità di assorbimento di energia molto più elevata di tipi precedenti, ed hanno migliori caratteristiche di limitazione della tensione.

I varistori GE-MOV® II sono dei componenti a semiconduttore dipendenti dalla tensione e simmetrici, che si comportano analogamente alle coppie di diodi zener in serie a polarità invertite, e servono per la protezione dei circuiti. Le caratteristiche di questi componenti li rendono adatti per la protezione contro gli elevati picchi transitori di tensione (la scelta del tipo deve essere appropriata): questi transitori saranno dissipati in un carico prima di arrivare al circuito protetto. Nel caso di sovratensioni, l'impedenza del varistor cambia da un valore di riposo molto elevato ad un valore molto basso di conduzione: in questo modo il valore del transitorio subirà una limitazione che lo manterrà entro i limiti di sicurezza. L'energia in eccesso dell'impulso ad alta tensione che si presenta all'ingresso viene assorbita dal varistor GE-MOV® II, e le apparecchiature sensibili alle tensioni elevate saranno così protette contro qualsiasi danno.

La protezione offerta dai varistori GE-MOV® II non è soltanto una salvaguardia offerta alle apparecchiature costose e sensibili alle elevate tensioni, che non subiranno danni fisici, ma aumenta anche l'affidabilità di quei componenti che possono subire guasti funzionali temporanei da parte di transitori di tensione di piccola ampiezza.

PREROGATIVE PRINCIPALI

■ Ampia estensione della tensione/energia ■ Eccellente rapporto di limitazione ■ Tempo di risposta veloce ■ Bassa potenza assorbita a riposo ■ Niente corrente secondaria ■ Approvati dalla UL.

Prodotti speciali per applicazioni speciali

Serie MA

- Contenitore assiale
- Vasta gamma di tensioni
- Inserzione automatica

Serie P

- Montaggio rigido
- Isolamento elettrodi secondo NEMA
- Terminali per connessione rapida
- Approvazione UL

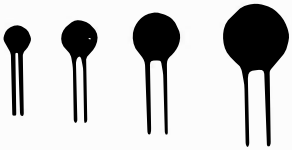
Serie RE

- Piastra di base isolata
- Isolamento elettrodi secondo NEMA
- Terminali rigidi
- Bassa induttanza
- Approvazione UL

Serie ad elevata affidabilità

- Collaudati al 100%
- Condizionamento di processo al 100%
- Soddisfano alle prescrizioni militari

Serie Z



- Connettori radiali
- Funzionamento a bassa tensione

Serie L

- Connettori radiali
- Funzionamento alla tensione di rete
- Approvazione UL

Serie C

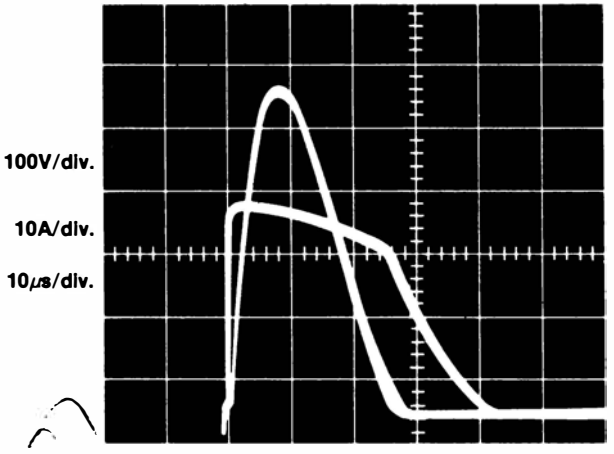
- Forma a disco senza involucro
- Protezione ad alta tensione
- Elevata dissipazione di energia

Nota: per il continuo programma di miglioramento del prodotto, le caratteristiche possono subire variazioni senza preavviso.

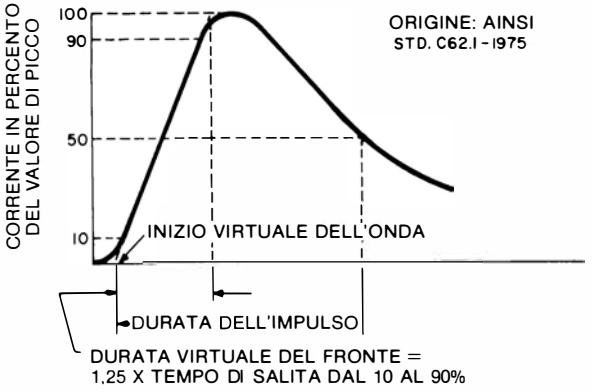
I CONCETTI DELLA PROTEZIONE CONTRO I TRANSITORI DI TENSIONE

Le caratteristiche dei varistori sono misurate ad elevati livelli di energia e ad elevate correnti sottoponendoli ad un'onda impulsiva. Nella figura che segue si vede la forma d'onda ANSI STD C62.1: si tratta di un'onda a smorzamento logaritmico che rappresenta i transitori dovuti ai fulmini e la scarica dell'energia immagazzinata nei circuiti reattivi.

La forma d'onda 8/20 μs (fronte di salita 8 μs e 20 μs per una diminuzione del 50% del valore di picco) è basata sulla pratica industriale, ed è usata come standard per la corrente (I_{TM}) e la tensione di limitazione (V_C), mostrate nelle tabelle e nelle



Onda di prova 8/20 μs, I_P -50 A, V_C - 315 V
V130LA10A



Onda impulsiva per la prova della corrente di picco.
Tempo di salita 6 μs/durata dell'impulso 20 μs
(fatta eccezione per quanto risulta sulle note).

curve di specifica. Le caratteristiche riferite ad altre onde ed a tempi di smorzamento diversi sono mostrate con tutti i particolari sulle curve di riduzione delle prestazioni per durata a regime impulsivo.

Per quanto riguarda le prestazioni energetiche (W_{TM}), si usa una forma d'onda di maggior durata (10/1000 μs). Questa situazione rappresenta meglio i transitori ad alta energia che si verificano di solito nella scarica induttiva di motori e trasformatori. I varitori GE-MOV® II sono dimensionati per i transitori con le massime energie impulsive, e perciò la deriva massima della tensione del varistor (V_N) sarà inferiore al ± (10% + 1 V) del valore iniziale.

Per determinare l'energia assorbita in un varistor, si applica la seguente equazione:

$$E = KV_C I \tau$$

dove I è la corrente di picco applicata, V_C è la tensione di limitazione risultante, τ è la durata d'impulso e K è una costante. I valori di K sono: 1,0 per onda rettangolare, 1,4 per l'onda 10/1000 μs, ed 1,0 per l'onda 8/20 μs.

Si noti che l'energia nominale (W_{TM}) e l'energia assorbita in un varistor possono anche non avere valori identici. Un campione con tensione di limitazione inferiore assorbi à meno energia. Gli effetti tendono ad essere più evidenti alla corrente di picco nominale (I_{TM}) con un'onda di 8/20 μs.

È importante notare che, come si dimostra nella precedente equazione, i varistori meno efficienti assorbiranno energie maggiori di quelli con maggiori prestazioni

DEFINIZIONI

TERMINI	DEFINIZIONI
TENSIONE C.C.	Massima tensione c.c. applicata in regime normale. Corrente a riposo c.c., ID = 20 μA (valore tipico), 200 μA (valore massimo) a TA=25 °C, tranne i V18ZA...V36ZA da 20 mm: I_D = 200 μA (val. tip.), 3 mA max
TENSIONE EFFICACE $V_{m(ca)}$	Tensione sinusoidale massima (valore efficace) a 50-60 Hz, ammessa. Applicando un'onda non sinusoidale, la tensione ripetitiva di picco dovrà essere limitata a $\sqrt{2}/V_{m(ca)}$.
ENERGIA W_{TM}	Massima energia ammissibile per un singolo impulso da 10 x 1000 μs in corrente. Energia assorbita basata su una variazione di VN inferiore al +/− 10%, o +/− 1 V rispetto al valore iniziale.
CORRENTE DI PICCO, I_{tm}	Massima corrente di picco ammissibile per un singolo impulso con forma d'onda da8 / 20 μs. Per la altre condizioni vedi le curve della durata di vita a regime impulsivo.
TENSIONE DEL VARISTOR V_N	Tensione di picco ai terminali del varistor, misurata con una data corrente passante. In corrente continua si fa passare una corrente di 1 mA per un tempo che va da 20 μs a 5 secondi. Per il funzionamento di alternata, si applica un'onda di 1 mA di picco ad una frequenza di 60 Hz.
TENSIONE DI LIMITAZIONE V_c	Tensione massima ai terminali misurata applicando un impulso da 8 x 20 μs di una data corrente di picco. Vedi le curve e le tabelle V-I per le tensioni di limitazione rispetto alla gamma ammessa di correnti impulsive di picco, per ogni tipo di componente.
CAPACITA'	Valori tipici misurati ad una frequenza di prova di 0,1..... 1,0 MHz. La capacità massima è due volte il valore tipico misurato ad 1 MHz.

con tensioni di limitazione più basse, anche se la protezione sarà inferiore. Per questo motivo, dei carichi energetici, basati su un impulso di 8/20 μs, tendono a sopravvalutare le capacità di assorbimento del varistor. La forma d'onda di 10/1000 μs fornisce di conseguenza un valore più realistico della dissipazione energetica.

VELOCITA' DI INTERVENTO

Il tempo di risposta misurato di un varistor viene influenzato dalla forma e dalla lunghezza dei cablaggi. Per un'applicazione tipica, il tempo di risposta è più breve di quanto potrebbe risultare dall'effetto induttivo dei fili di collegamento. In una configurazione coassiale, il tempo di risposta sarà dell'ordine di alcuni nanosecondi (riferimento: proposta di norme IEEE per standard Varistor Test P165•3).

PRECAUZIONI DI SICUREZZA CON I VARISTORI

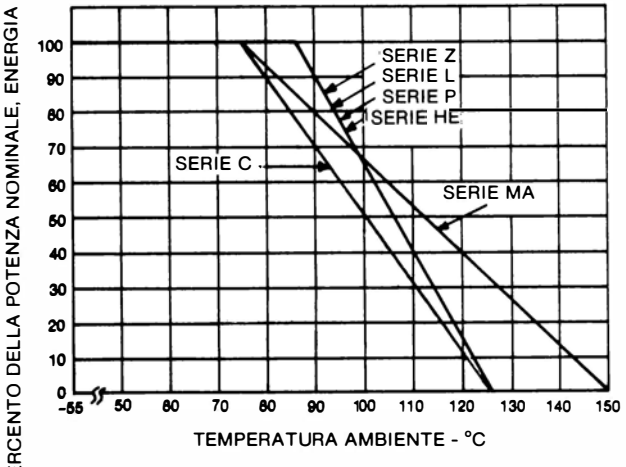
Se il varistor deve essere assoggettato a correnti transitorie ed a livelli di energia che superino le sue prestazioni nominali, potrà accedere la sua rottura con proiezioni di materiale. Si raccomanda di usare dei fusibili di protezione del tipo descritto nel Manuale dei varistori, capitolo quattro. Se non protetto da fusibili, il varistor deve essere collocato lontano da altri componenti oppure essere munito di schermatura meccanica.

GUIDA DELLE SELEZIONI DELLA PRODUZIONE DEI VARISTORI

Corrente di picco impulsiva (Ampere)	Energia (Joules)	Massima tensione applicata in esercizio normale	Dimensioni dischi
		10 15 35 75 95 130 150 225 270 420 480 550 575 750 1100 2000 2500 2800	
		14 20 40 100 120 180 800 970 1400 2500 3000 3500	
40-100	.07-1.7	**SERIE MA** 10-373 VRMS 14-365 VDC	3mm
250-4500	.6-35	**SERIE Z** 6-115 VRMS 8-153 VDC	7, 14, 20mm
800-6500	7-360	**SERIE L** 130-1000 eff 175-1200 VDC	7, 14, 20mm
6500	70-250	**SERIE P** 130-660 eff 175-850 VDC	20mm
15,000-25,000	200-700	**SERIE HE** 130-750 eff 175-970 VDC eff	32mm
50,000	1000-6500	**SERIE C** 420-2800 eff 560-3500 VDC	50mm Disc

SERIE	MA	Z	L	P	HE	C
Temperatura ambiente di funzionamento	+75°C	+85°C	+85°C	+85°C*	+85°C	+75°C
Temperatura di conservazioni	da -55 a + 150°C	da -55 a + 125°C	da -55 a + 125°C	da -40 a + 125°C	da -40 a + 125°C	da -55 a + 125°C
Incapsulamento HiPot Volt c.c. per 1 minuto	1000	2500	2500	non applicabile	2500	non applicabile
Coefficiente tensione-temperatura	-0,03%/°C	-0,05%/°C	-0,05%/°C	-0,05%/°C	-0,05%/°C	-0,10%/°C
Resistenza di isolamento (MΩ)	> 1000	> 1000	> 1000	non applicabile	non applic.	non applicabile

*Temperatura della piastra di base. Saldabiltà: secondo mil std 202E, metodo 208C.



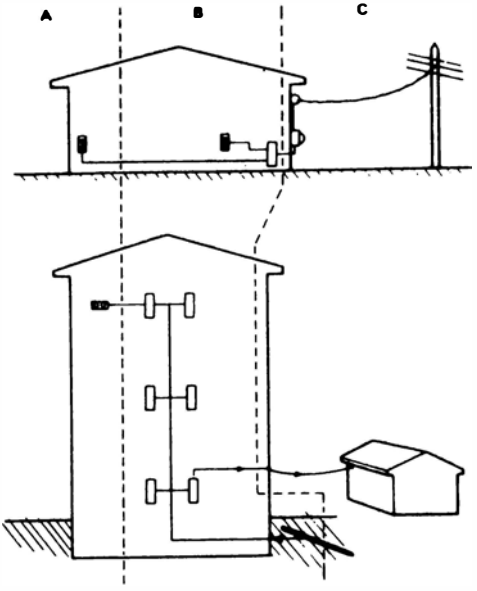
CORRENTE, POTENZA, ENERGIA DISSIPATA
IN RAPPORTO ALLA TEMPERATURA

COME SCEGLIERE UN VARISTOR GE-MOV® II

Per scegliere il giusto varistor GE-MOV® II per una data applicazione, assumere le seguenti informazioni;

1. Quale è la tensione efficace o c.c. del sistema?
   A. Tra fase e massa _____ .
   B. Tra fase e fase _____ .

2. Come verrà collegato il varistor GE-MOV® II?
   A. Tra fase e massa _____ .
   B. Tra fase e fase _____ .



A) *Prese e lunghi circuiti derivati.*
Tutte le prese a più di 10 m della categoria B con fili # 14-10.
Tutte le prese a più di 20 m, della categoria C, con fili # 14-10.

B) *Cavi principali e corte diramazioni.*
Componenti di quadri di distribuzione.
Linee principali di distribuzione in impianti industriali.
Prese per correnti forti con "brevi" collegamenti alla cabina.
Sistemi di illuminazione in edifici commerciali.

C) *Impianti esterni e di cabina.*
Cavo di servizio tra palo e cabina.
Tratto tra contatore e quadro di distribuzione.
Da linea principale ad edifici staccati.
Linee sotterranee per pompe di pozzo.

Figura 1 - Categoria di collocazione.

3. Calcolatore la tensione del varistor occorrente, in modo che sia superiore del 10-25% alla tensione efficace o c.c.
   A. V fase-massa X 1,1 = _____ .
   B. V fase-fase X 1,1 = _____ .

   La massima tensione del varistor (alternata efficace o continua) dovrà essere uguale o maggiore di 3A oppure di 3B. Questa tensione massima continua od alternata del varistor si potrà trovare sulle tabelle delle caratteristiche ($V_{m(ca)}$ o $V_{m(ca)}$).

4. La scelta della giusta tensione del varistor è relativamente semplice; più difficile è la scelta della prestazione energetica, ed esiste un certo grado di incertezza. Un espediente potrebbe consistere nello scegliere la massima energia a disposizione, ma di solito il sistema non è economico.
   Poiché nel processo di scelta entrano delle considerazioni economiche, non sarà possibile ingnorare l'eventuale transitorio di massima gravità, la frequenza degli eventi e la durata prevista per l'apparecchio da proteggere.
   Le norme IEEE 587 danno un indirizzo a queste considerazioni, e sono ristampate nel manuale per la soppressione dei transitori, di cui fa parte questa nota. Risulta evidente dalle norme IEEE 587 che non è tanto importante "quale" sia l'apparecchio da proteggere ma "dove" questo apparecchio sia collocato nell'ambiente elettrico. Le norme IEEE 587 suddividono i sistemi di distribuzione elettrica in 3 categorie di collocazione. La figura 1 definisce queste categorie nei particolari.

TABELLA 1. TENSIONI TRANSITORIE E CORRENTI CHE SI RITIENE RAPPRESENTINO L'AMBIENTE INTERNO, CON I VALORI RACCOMANDATI PER L'USO NELLA PROGETTAZIONE DEI SISTEMI DI PROTEZIONE

Categoria delle collocazioni	Confrontabile alla categoria IEC 644	Impulsi		Tipo del campione o circuito di carico	Energia (Joule) dissipata in un soppressore con tensione di limitazione di:	
		Forma d'onda	Massima ampiezza d'esposizione		500V	1000V
					(120V System)	(240V System)
A. derivazioni lunghe e prese	II	0.5 μs - 100 kHz	6k V	Alta impedenza	—	—
			200 A	Bassa impedenza	0.8	1.6
B. Linee principali e derivazioni corte, centri di distribuzione	III	1.2/50 μs 8/20 μs	6k V	Alta impedenza	—	—
			3k A	Bassa impedenza	40	80
		0.5 μs - 100 kHz	6k V	Alta impedenza	—	—
			550 A	Bassa impedenza	2	4

Note: **(1)** Per campioni di prova ad alta impedenza o per circuiti di carico, le tensioni riportate rappresentano i transitori. Nell'effettuare prove di simulazione, usare questo valore come tensione a circuito apero del generatore di prova.
(2) Per campioni di prova a bassa impedenza, o circuito di carico, le correnti tabellate rappresentano la corrente di scarica del transitorio (non la corrente di corto circuito del sistema elettrico di distribuzione). Quando si effettuano delle prove simulate, si faccia uso di questa corrente come corrente di cortocircuito del generatore di prova.
(3) Altri soppressori con tensioni di limitazione diverse, potranno dissipare livelli diversi di energia.

La tabella 1 mostra le tensioni a circuito aperto e le correnti di cortocircuito dei transitori che ci si possono attendere nelle collocazioni A e B.

Il varistor GE-MOV® II scelto deve in primo luogo sopravvivere alle condizioni di massima sollecitazione transitoria possibile (vedi "ampiezza di esposizione media" in tabella 1) e poi deve limitare a livelli di sicurezza per l'apparecchio protetto o per i suoi componenti le tensioni massime a circuito aperto.

5. Scegliere la categoria di collocazione più adatta (A oppure B)

6. Determinare la corrente e la tensione di transitorio per la massima sollecitazione, dalla tabella 1.

7. Conoscendo la tensione massima continua od alternata efficace del varistor (dal punto 3), determinare la tensione massima di limitazione dalla curva V-I del componente scelto, usando la corrente di transitorio di massima sollecitazione trovata al punto 6.

8. Questa tensione di limitazione potrà garantire il livello di protezione richiesto? In caso negativo, ripetere il passo 7 usando un componente a maggior energia nominale. Se questo procedimento si dimostrasse inefficace, consultare il locale Ufficio vendite delle G.E per la necessaria assistenza.

9. In molti casi è nota l'origine del transitorio. Si potrà calcolare l'energia del transitorio e si potrà determinare la tensione massima di limitazione dalla curva caratteristica V-I, poiché è nota la corrente masima dell'impulso, oppure l'impedenza del generatore. Si possono trovare esempi di questi calcoli nel manuale per la soppressione dei transitori, capitolo 4.

TABELLA DELLE PRESTAZIONI E DELLE CARATTERISTICHE - SERIE MA

SIGLA DEL MODELLO	PRESTAZIONI MASSIME (25°C)				CARATTERISTICHE				
	CONTINUA		TRANSITORIA		TENSIONE DEL VARISTOR AD UNA CORRENTE DI PROVA DI 1 mA c.c.			MASSIMA TENSIONE DI LIMIT. AD UNA CORRENTE DI PROVA (8/20 µs)	CAPACITA' TIPICA
	TEN-SIONE CC	RMS TENS. EFF.	ENERGIA (10/1000 µs)	CORRENTE DI PICCO (8/20 µs)					
	$V_{m(cc)}$	$V_{m(ca)}$	W_{TM}	I_{TM}				TEST V_C	f = 0.1-1 MHz
	VOLT	VOLT	JOULE (WATT-SEC)	AMPERE	MIN.	V_N	MAX.	VOLT	PICOFARAD
V18MA1B	14	10	0.07	40	15.0	18	21.0	44	550
V22MA1B	18	14	0.10	40	19.0	22	26.0	51	410
V27MA1B	22	17	0.11	40	24.0	27	31.0	59	370
V33MA1A	23	18	0.13	40	26.0	33	40.0	73	300
V33MA1B	26	20	0.15		29.5		36.5	67	
V39MA2A	28	22	0.16	40	31.0	39	47.0	86	250
V39MA2B	31	25	0.18		35.0		43.0	79	
V47MA2A	34	27	0.19	40	37.0	47	57.0	99	210
V47MA2B	38	30	0.21		42.0		52.0	90	
V56MA2A	40	32	0.23	40	44.0	56	68.0	117	180
V56MA2B	45	35	0.25		50.0		62.0	108	
V68MA3A	48	38	0.26	40	54.0	68	82.0	138	150
V68MA3B	56	40	0.30		61.0		75.0	127	
V82MA3A	60	45	0.33	40	65.0	82	99.0	163	120
V82MA3B	66	50	0.37		73.0		91.0	150	
V100MA4A	72	57	0.40	40	80.0	100	120.0	200	100
V100MA4B	81	60	0.45		90.0		110.0	185	
V120MA1A	97	72	0.40	100	102.0	120	138.0	220	40
V120MA2B	101	75	0.50		108.0		132.0	205	
V150MA1A	121	88	0.50	100	127.0	150	173.0	255	32
V150MA2B	127	92	0.60		135.0		165.0	240	
V180MA1A	144	105	0.60	100	153.0	180	207.0	310	27
V180MA3B	152	110	0.70		162.0		198.0	290	
V220MA2A	181	132	0.80	100	187.0	220	253.0	380	21
V220MA4B	191	138	0.90		198.0		242.0	360	
V270MA2A	224	163	0.90	100	229.0	270	311.0	460	17
V270MA4B	235	171	1.0		243.0		297.0	440	
V330MA2A	257	188	1.0	100	280.0	330	380.0	570	14
V330MA5B	274	200	1.1		297.0		363.0	540	
V390MA3A	322	234	1.2	100	331.0	390	449.0	670	12
V390MA6B	334	242	1.3		351.0		429.0	640	
V430MA3A	349	253	1.5	100	365.0	430	495.0	740	11
V430MA7B	365	373	1.7		387.0		473.0	700	

Serie Z
Reofori radiali di 7, 14, 20 mm.

TABELLA DELLE PRESTAZIONI E DELLE CARATTERISTICHE - SERIE Z

SIGLA DEL MODELLO	DIMENSIONE DEL MODELLO (mm)	PRESTAZIONI MASSIME (25° C)				CARATTERISTICHE					
		CONTINUA		TRANSITORIA		TENSIONE DEL VARISTOR AD UNA CORRENTE DI PROVA DI 1 mA c.c.			MASSIMA TENSIONE DI LIMITAZIONE AD UNA CORRENTE DI PROVA (8/20 µs)		CAPACITA' TIPICA
		RMS TENS. EFF.	TENS. EFF. CC	ENERGIA (10/1000 µs)	CORRENTE DI PICCO (8/20 µs)						
		$V_{m(ca)}$	$V_{m(cc)}$	W_{TM}	I_{TM}	MIN.	V_N	MAX.	V_C	I_P	f = 0.1-1 MHz
		VOLT	VOLT	JOULE	AMPERE	VOLT	VOLT	VOLT	VOLT	AMP	PICOFARAD
V12ZA1	7	6	8	0.6	250	8.4	12	16.0	34	5	3000
V18ZA1	7	10	14	0.8	250	14.4	18	21.6	42	5	2500
V18ZA3	14			3.5	1000				39	10	12000
V18ZA40	20			80.0*	2000		18†		37	20	25000
V22ZA1	7	14	18‡	0.9	250	18.7	22	26.0	47	5	2000
V22ZA3	14			4.0	1000				43	10	10000
V24ZA50	20	14	18‡	100.0*	2000	19.2	24†	26.0	43	20	20000
V27ZA1	7	17	22	1.0	250	23.0	27	31.1	57	5	1700
V27ZA4	14			5.0	1000				53	10	8500
V27ZA60	20		22	120.0*	2000		27†		50	20	18000
V33ZA1	7	20	26	1.2	250	29.5	33	36.5	68	5	1400
V33ZA5	14			6.0	1000				64	10	7000
V33ZA70	20	21	27	150.0*	2000		33†		58	20	15000
V36ZA80	20	23	31	160.0*	2000	32.0	36†	40.0	63	20	12000
V39ZA1	7	25	31	1.5	250	35.0	39	43.0	79	5	1200
V39ZA6	14			7.2	1000				76	10	6000
V47ZA1	7	30	38	1.8	250	42.0	47	52.0	92	5	1000
V47ZA7	14			8.8	1000				89	10	5000
V56ZA2	7	35	45	2.3	250	50.0	56	62.0	107	5	800
V56ZA8	14			10.0	1000				103	10	4000
V68ZA2	7	40	56	3.0	250	61.0	68	75.0	127	5	700
V68ZA10	14			13.0	1000				123	10	3500
V82ZA2	7	50	66	4.0	250	74.0	82	91.0	152	5	600
V82ZA12	14			15.0	1000				147	10	3000
V100ZA3	7	60	81	5.0	250	90.0	100	110.0	180	5	500
V100ZA15	14			20.0	1000				175	10	2500
V120ZA1	7	75	102	6.0	1200	108.0	120	132.0	205	10	200
V120ZA6	14			22.0	4500				210	50	1200
V150ZA1	7	95	127	8.0	1200	135.0	150	165.0	250	10	170
V150ZA8	14			30.0	4500				255	50	1000
V180ZA1	7	115	153	10.0	1200	162.0	180	198.0	295	10	140
V180ZA10	14			35.0	4500				300	50	800

Nota: la dissipazione in transitorio non deve superare 0,25 0,6 1,0 rispettivamente per le misure 7,14 e 20 mm. .
† Corrente, di prova in c.c. di 10 mA
‡ Energia dissipata d'impulso di 30 ms per decadere a metà del valore della corrente di picco.

Serie LA
Reofori radiali di 7, 14, 20 mm

Varistori ad ossido metallico GE-MOV®II per la protezione contro i transitori di tensione

TABELLA DELLE PRESTAZIONI E DELLE CARATTERISTICHE - SERIE L

I varistori serie L sono elencati in UL file # E75961.
(Sostituisci E 56579) come componente riconosciuto UL.

SIGLA DEL MODELLO	DIMENSIONE DEL MODELLO (mm)	PRESTAZIONI MASSIME (25°C)				CARATTERISTICHE					
		CONTINUA		TRANSITORIA		TENSIONE DEL VARISTOR AD UNA CORRENTE DI PROVA DI 1 mA c.c.			MASSIMA TENSIONE DI LIMITAZIONE AD UNA CORRENTE DI PROVA (8/20 µs)		CAPACITA' TIPICA
		RMS TENS. EFF.	TENS. EFF. CC	ENERGIA (10/1000 µs)	CORRENTE DI PICCO (8/20 µs)						
		$V_{m(ca)}$	$V_{m(cc)}$	W_{TM}	I_{TM}	MIN.	V_N	MAX.	V_C	I_P	f = 0.1-1 MHz
		VOLT	VOLT	JOULE	AMPERE	VOLT	VOLT	VOLT	VOLT	AMP	PICOFARAD
V130LA1	7	130	175	7	800	184	200	255	390	10	180
V130LA2	7			11	1200			228	340	10	180
V130LA10A	14			38	4500			228	340	50	1000
V130LA20A	20			70	6500			228	340	100	1900
V130LA20B	20			70	6500			220	325	100	1900
V150LA1	7	150	200	8	800	212	240	284	430	10	150
V150LA2	7			13	1200			268	395	10	150
V150LA10A	14			45	4500			268	395	50	800
V150LA20A	20			80	6500			268	395	100	1600
V150LA20B	20			80	6500			243	360	100	1600
V250LA2	7	250	330	14	800	354	390	473	730	10	110
V250LA4	7			21	1200			429	650	10	110
V250LA20A	14			72	4500			429	650	50	500
V250LA40A	20			130	6500			429	650	100	1000
V250LA40B	20			130	6500			413	620	100	1000
V275LA2	7	275	369	15	800	389	430	515	775	10	100
V275LA4	7			23	1200			473	710	10	100
V275LA20A	14			75	4500			473	710	50	450
V275LA40A	20			140	6500			473	710	100	900
V275LA40B	20			140	6500			453	680	100	900
V300LA2	7	300	405	16	800	420	470	565	870	10	90
V300LA4	7			25	1200			517	775	10	90
V320LA20A	14	320	420	90	4500	462	510	565	850	50	380
V320LA40B	20			160	6500			540	810	100	750
V420LA20A	14	420	560	90	4500	610	680	748	1120	50	500
V420LA40B	20			160	6500			720	1060	100	1000
V480LA40A	14	480	640	105	4500	670	750	825	1240	50	450
V480LA80B	20			180	6500			790	1160	100	900
V510LA40A	14	510	675	110	4500	735	820	910	1350	50	400
V510LA80B	20			190	6500			860	1280	100	800
V575LA40A	14	575	730	120	4500	805	910	1000	1500	50	370
V575LA80B	20			220	6500			960	1410	100	750
V1000LA80A	14	1000	1200	220	4500	1425	1600	1800	2700	50	200
V1000LA180B	20			360	6500			1650	2420	100	400

Nota: La potenza dissipata in transitorio non deve superare i 0,25 0,6 1,0 W rispettivamente per le dimensioni 7, 14 e 20 mm.

Serie P
Terminali rigidi, distanza tra i reofori, 20 mm.

Serie HE
Terminali rigidi, distanza tra i reofori, 32 mm

TABELLA DELLE PRESTAZIONI E DELLE CARATTERISTICHE - SERIE P/HE

I varistori della serie Pa/HE sono elencati in UL file # E75961.
(Sostituisce E 56579) come componenti approvati UL.

SIGLA DEL MODELLO	PRESTAZIONI MASSIME (25°C)				CARATTERISTICHE					
	CONTINUA		TRANSITORIA		TENSIONE DEL VARISTOR AD UNA CORRENTE DI PROVA DI 1 mA c.c.			MASSIMA TENSIONE DI LIMITAZIONE AD UNA CORRENTE DI PROVA (8/20 µs)		CAPACITA' TIPICA
	RMS TENS. EFF.	TENS. EFF. CC	ENERGIA (10/1000 µs)	CORRENTE DI PICCO (8/20 µs)						
	$V_{m(ca)}$	$V_{m(cc)}$	W_{TM}	I_{TM}	MIN.	V_N	MAX.*	V_C	I_P	f = 0.1-1 MHz
	VOLT	VOLT	JOULE	AMPERE	VOLT	VOLT	VOLT	VOLT	AMP	PICOFARAD
V130PA20A	130	175	70	6,500	184	200	243	360	100	2400
V130PA20C							220	325	100	
V130HE150			200	20,000			228	365	300	4700
V150PA20A	150	200	80	6,500	212	240	284	420	100	2000
V150PA20C							243	360	100	
V150HE150			220	20,000			268	425	300	4000
V250PA40A	250	330	130	6,500	354	390	453	675	100	1200
V250PA40C							413	620	100	
V250HE250			330	20,000			429	690	300	2500
V275PA40A	275	369	140	6,500	389	430	494	740	100	1100
V275PA40C							453	680	100	
V275HE250			360	20,000			473	760	300	2250
V320PA40A	320	420	160	6,500	462	510	565	850	100	1000
V320PA40C							540	800	100	
V320HE300			390	20,000			539	860	300	1900
V420PA40A	420	560	160	6,500	610	680	790	1160	100	1200
V420PA40C							690	1050	100	
V420HE400			400	25,000			748	1200	300	3000
V480PA80A	480	640	180	6,500	670	750	860	1280	100	1100
V480PA80C							790	1160	100	
V480HE450			450	25,000			824	1320	300	2700
V510PA80A	510	675	190	6,500	735	820	963	1410	100	1000
V510PA80C							860	1280	100	
V510HE500			500	25,000			910	1450	300	2400
V575PA80A	575	730	220	6,500	805	910	1050	1560	100	900
V575PA80C							960	1410	100	
V575HE550			550	25,000			1005	1600	300	2200
V660PA100A	660	850	250	6,500	940	1050	1210	1820	100	800
V660PA100C							1100	1650	100	
V660HE600			600	25,000			1160	1850	300	1900
V750HE700	750	970	700	25,000	1080	1200	1320	2100	300	1700

* Con test in ca 50-60 Hz la massima tensione per picchi di corrente da 1 mA e del 5% più alta.
Nota: La potenza dissipata in un transitorio non deve superare 1.0-1.5 watt per i varistori delle serie PA/HE.

Varistori ad ossido metallico GE-MOV® II per la protezione contro i transitori di tensione

Serie C
Di forma circolare, 32 mm, 50 mm.

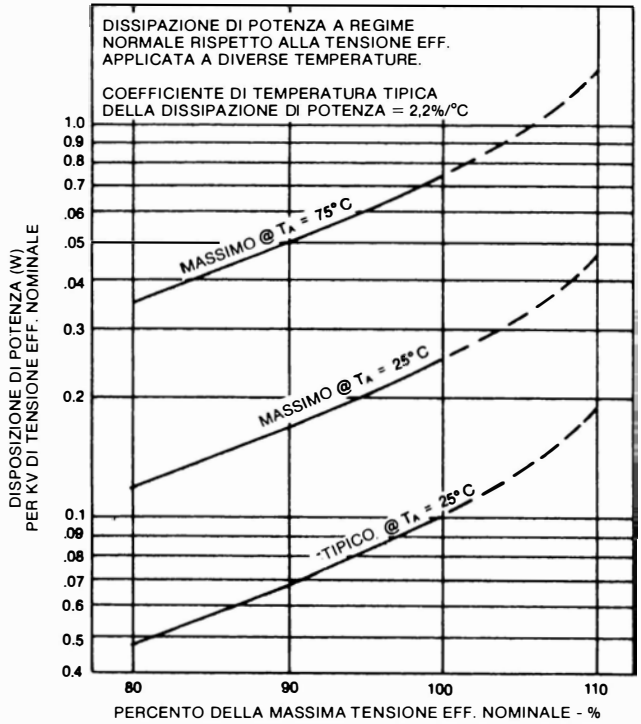
TABELLA DELLE PRESTAZIONI E DELLE CARATTERISTICHE - SERIE C

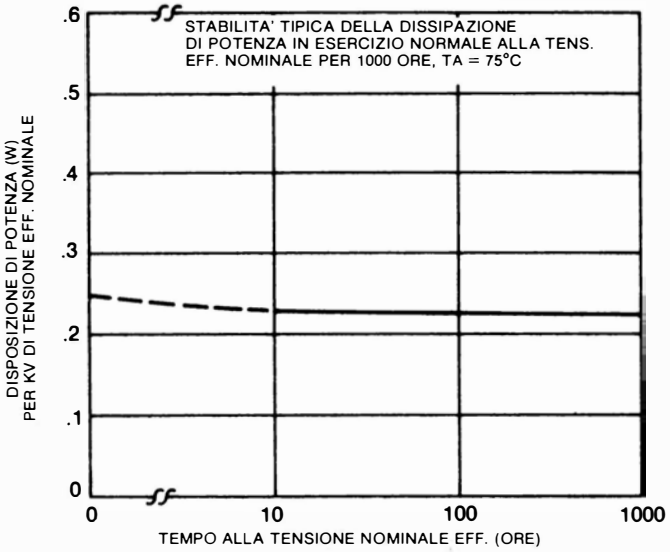
SIGLA DEL MODELLO	DIMENSIONE DEL MODELLO (mm)	PRESTAZIONI MASSIME (25°C)				CARATTERISTICHE			
		CONTINUA		TRANSITORIA		TENSIONE DEL VARISTOR AD UNA CORRENTE DI PROVA DI 1 mA c.c.			MASSIMA TENSIONE DI LIMITAZIONE AD UNA CORRENTE DI PROVA (8/20 µs)
		RMS TENS. EFF.	CC TENS. EFF	ENERGIA (10/1000 µs)	CORRENTE DI PICCO (8/20 µs)				
		$V_{m(ca)}$	$V_{m(cc)}$	W_{TM}	I_{TM}	MIN.	V_N	MAX.*	V_C
		VOLT	VOLT	JOULE	AMPERE	VOLT	VOLT	VOLT	VOLT
V421CA401	32	420	560	400	25,000	610	680	748	1180
V421CA102	50			1000	50,000				1140
V481CA451	32	480	640	450	25,000	670	750	825	1300
V481CA112	50			1100	50,000				1250
V511CA501	32	510	675	500	25,000	735	820	910	1420
V511CA122	50			1200	50,000				1370
V571CA551	32	575	730	550	25,000	805	910	1000	1580
V571CA142	50			1400	50,000				1530
V661CA601	32	660	850	600	25.000	940	1050	1160	1820
V661CA152	50			1500	50,000				1750
V751CA701	32	750	970	700	25.000	1080	1200	1320	2070
V751CA172	50			1700	50,000				2000
V881CA851	32	880	1150	850	25,000	1290	1500	1650	2570
V881CA212	50			2100	50,000				2500
V112CA103	32	1100	1400	1000	25,000	1620	1800	2060	3200
V112CA252	50			2500	50.000				3100
V142CA332	50	1400	1750	3300	50,000	2020	2200	2550	3900
V172CA402	50	1700	2150	4000	50,000	2500	2700	3030	4500
V202CA502	50	2000	2500	5000	50.000	2970	3300	3630	5500
V242CA572	50	2400	3000	5700	50,000	3510	3900	4290	6600
V282CA652	50	2800	3500	6500	50,000	4230	4700	5170	7800

* Con test in ca 50-60 Hz la massima tensione per picchi di corrente da 1 mA è del 5% più alta.

Nota: La potenza dissipata in transitorio non deve superare 1.5, 2.5 watt rispettivamente per le dimensioni 32 e 50 mm.

DISSIPAZIONE DI POTENZA A REGIME NORMALE





PROVE MECCANICHE ED AMBIENTALI: SERIE AD ALTA AFFIDABILITA'

Il varistor GE-MOV® II ad alta affidabilità è il più recente passo in avanti nel miglioramento delle prestazioni dei componenti. Le applicazioni che richiedono garanzia di qualità in condizioni ambientali estreme, potranno ora trarre vantaggio da questa tecnica. I varistori di questa nuova serie sono collaudati al 100% e subiscono un processo di condizionamento in modo da soddisfare a severi requisiti meccanici ed elettrici.

COLLAUDO AL 100%

Ispezione prima dell'incapsulaggio	Ispezione visuale dei reofori e del disco prima dell'incapsulaggio
Collaudo elettrico	I_L @ 10.0 μA, V_N @ 1 mA cc, V_C @ 100 Amp (8/20 μs)
Ispezione finale	Integrità del rivestimento, reofori, contrassegni ed aspetto esterno

PROCESSO DI CONDIZIONAMENTO al 100%

NOME DELLA PROVA	METODI DI PROVA (MIL-750B)	DESCRIZIONE
Durata di vita ad alta temperatura	Metodo 1032.1	125°C, in forno per 24 ore
Urto termico	Metodo 1051.1	Aria-aria da −55°C a 125°C, 5 cicli
Accelerazione costante	Metodo 2006	20,000 G, Z1
Durata in ambiente umido	Nessun equivalente	85°C, 85% U.R. 168 ore di esposizione
Invecchiamento preventivo	Metodo 1038, cond. B	72 ore, 85°C, V_{ACM} nominale
Collaudo dopo l'i.p.	Nessun equivalente	Selezione per V_N e V_C, POA al 10%
Ispezione visiva	Metodo 2071	Incapsulaggio, contrassegni, aspetto esterno, reofori

PROVE DI QUALITA' DOPO IL CONDIZIONAMENTO

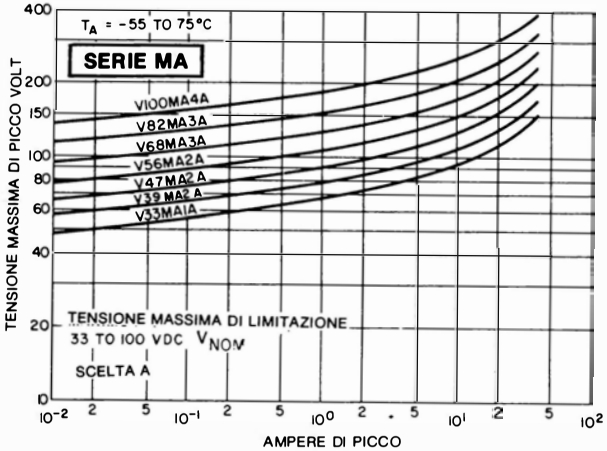
- Elettriche (bidirezionali), V_N, V_C — 0.65% AQL LEVEL II
- BV dielettrico — 0.65% AQL LEVEL I
- Capacità 1 MHz — 1.0% AQL LEVEL S-4
- Stabilità (senza attivazione) — 1.0% AQL LEVEL S-4

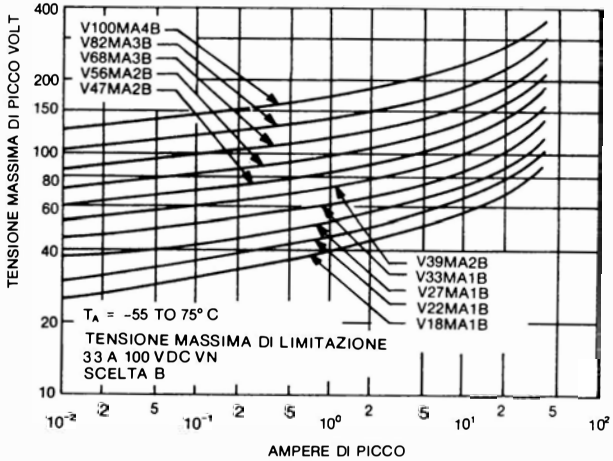
PRESTAZIONI SUPPLEMENTARI

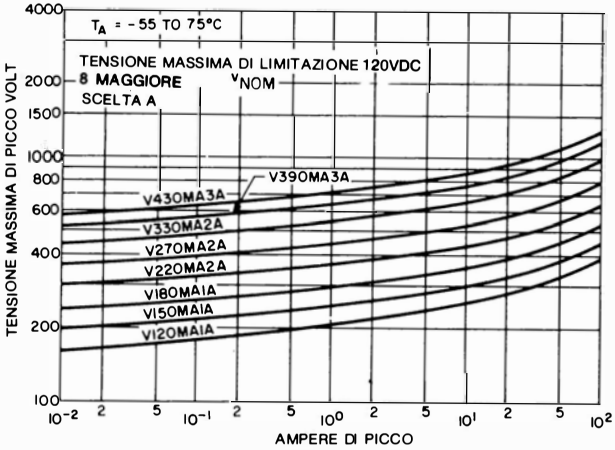
NORME DELLA PROVA	METODO DI PROVA (MIL-750N)	DESCRIZIONE
Robustezza dei terminali	Metodo 2036.3	3 piegature, arco 90°, peso 16 once
Urto	Metodo 2016.2	1500 G, 0,5 ms; 5 impulsi; X1, Y1, Z1
Vibrazione a frequenza variabile	Metodo 2056	20 G; 100-2000 Hz; X1, Y1, Z1
Nebbia salina	Metodo 1041	35°C; 24 ore; 10-50 G/M^2/giorno
Calore di saldatura	Metodo 2031	260°C; 10 sec.; 3 cicli; prova
Resistenza ai solventi	MIL-202E, Metodo 215	Fino a quando il rivestimento è intaccato; 3 solventi
Infiammabilità	MIL-202E, Metodo 111A	Bruciatura con torcia per 15 sec; 10 sec. per l'estinzione.

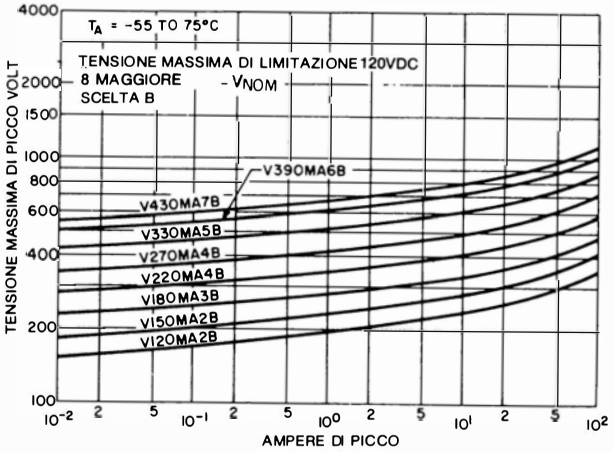
Nota: I varistori ad alta affidabilità possono sopportare una temperatura minima di magazzinaggio di −65°C.
Si prega di prendere contatto con il locale rappresentante General Electric per ogni particolare.

CARATTERISTICHE, V-I AL TRANSITORIO:

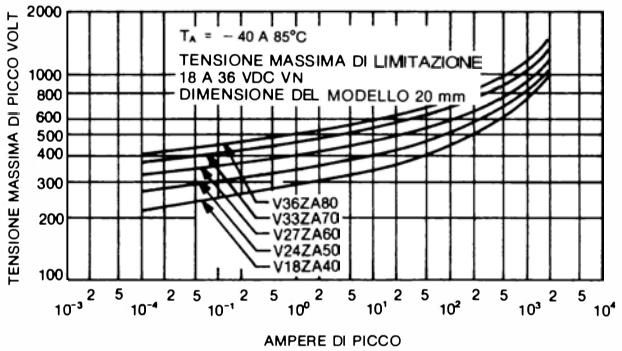


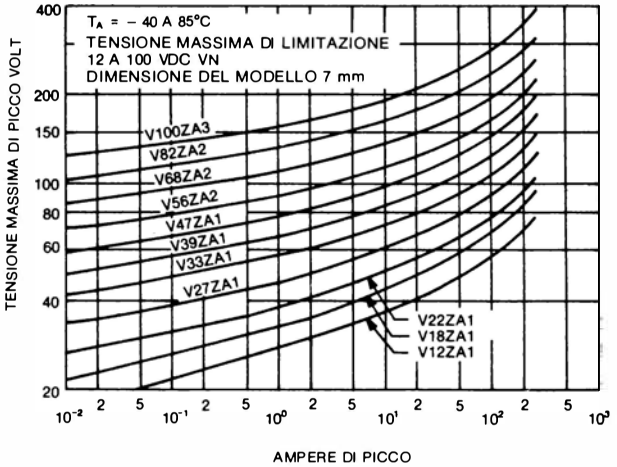


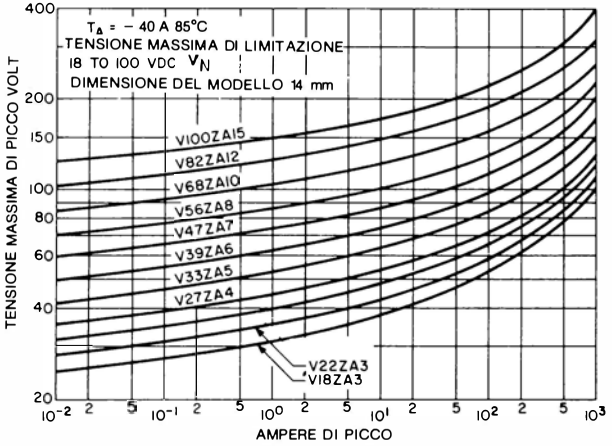


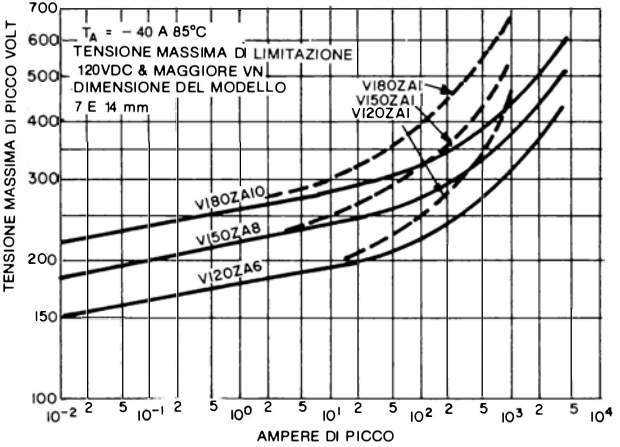


SERIE Z

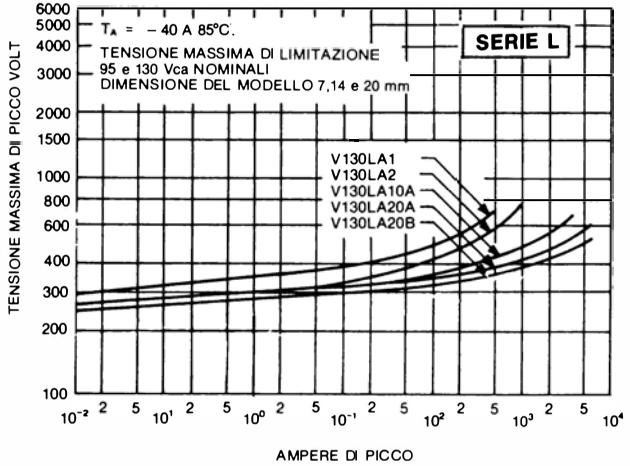

T_A = − 40 A 85°C
TENSIONE MASSIMA DI LIMITAZIONE
18 A 36 VDC VN
DIMENSIONE DEL MODELLO 20 mm
V36ZA80
V33ZA70
V27ZA60
V24ZA50
V18ZA40
TENSIONE MASSIMA DI PICCO VOLT
AMPERE DI PICCO

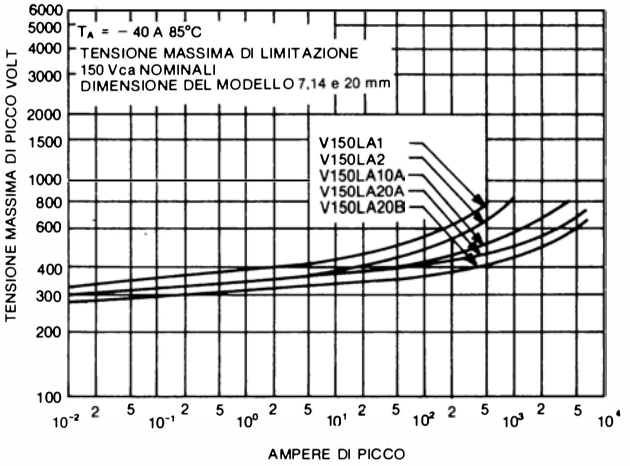

T_A = − 40 A 85°C
TENSIONE MASSIMA DI LIMITAZIONE
12 A 100 VDC VN
DIMENSIONE DEL MODELLO 7 mm
V100ZA3
V82ZA2
V68ZA2
V56ZA2
V47ZA1
V39ZA1
V33ZA1
V27ZA1
V22ZA1
V18ZA1
V12ZA1
TENSIONE MASSIMA DI PICCO VOLT
AMPERE DI PICCO

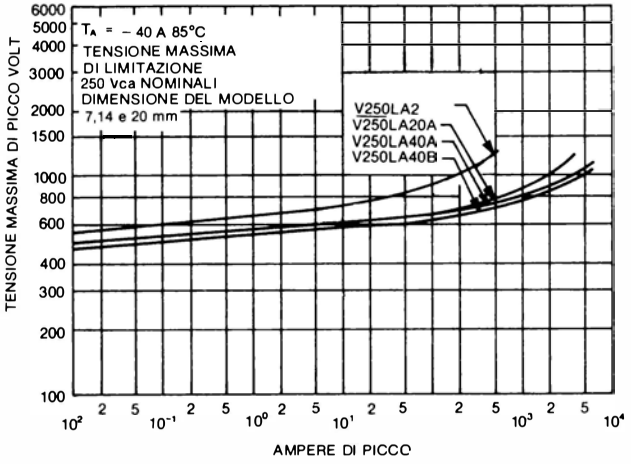

T_A = − 40 A 85°C
TENSIONE MASSIMA DI LIMITAZIONE
18 TO 100 VDC V_N
DIMENSIONE DEL MODELLO 14 mm
V100ZA15
V82ZA12
V68ZA10
V56ZA8
V47ZA7
V39ZA6
V33ZA5
V27ZA4
V22ZA3
V18ZA3
TENSIONE MASSIMA DI PICCO VOLT
AMPERE DI PICCO

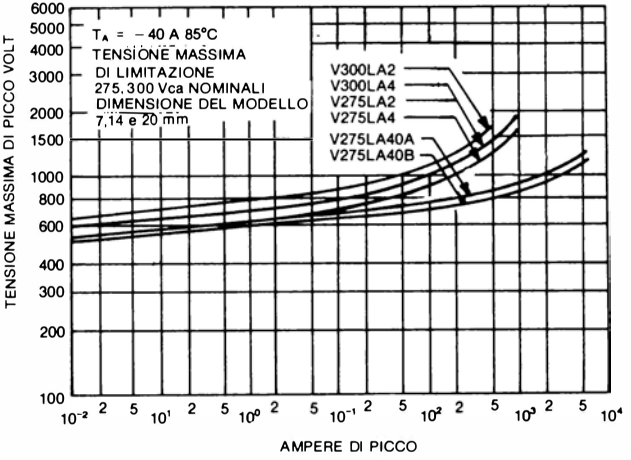

T_A = − 40 A 85°C
TENSIONE MASSIMA DI LIMITAZIONE
120VDC & MAGGIORE VN
DIMENSIONE DEL MODELLO
7 E 14 mm
V180ZA1
V150ZA1
V120ZA1
V180ZA10
V150ZA8
V120ZA6
TENSIONE MASSIMA DI PICCO VOLT
AMPERE DI PICCO

CARATTERISTICHE V-I AL TRANSITORIO:

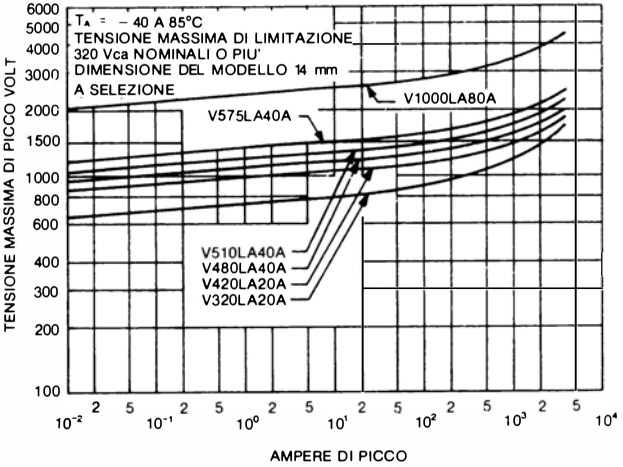


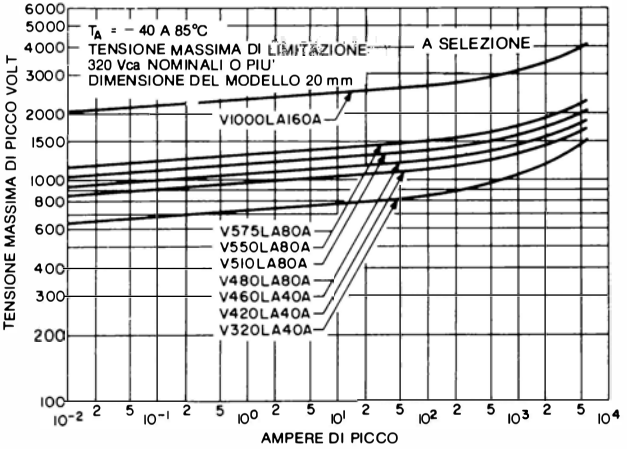


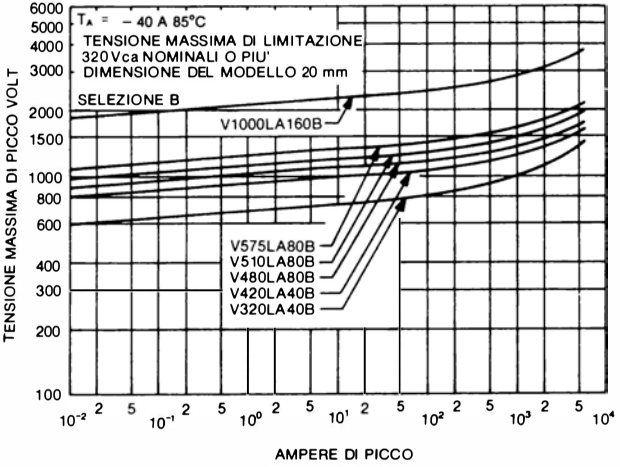




CONTINUA SERIE L

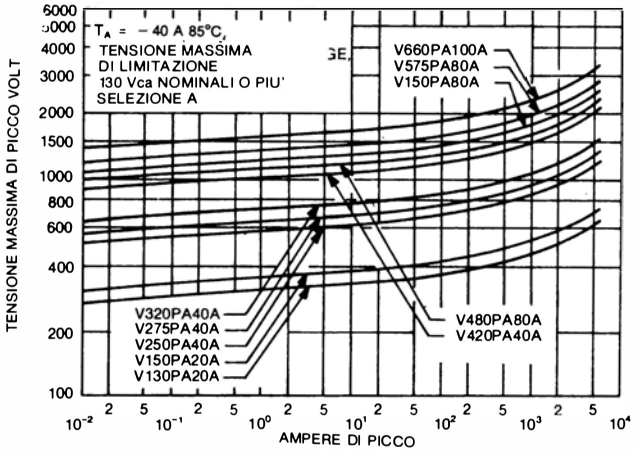


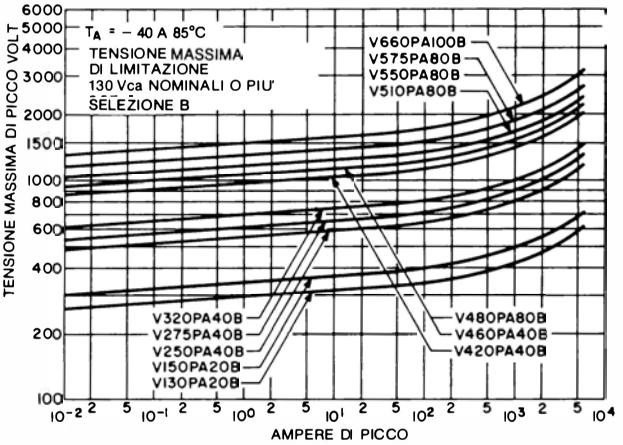




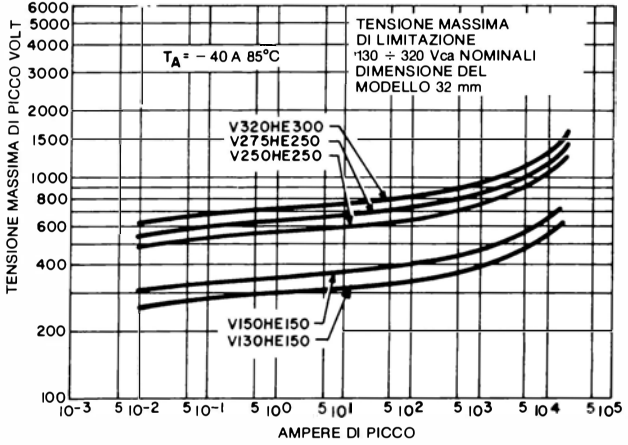
SERIE P

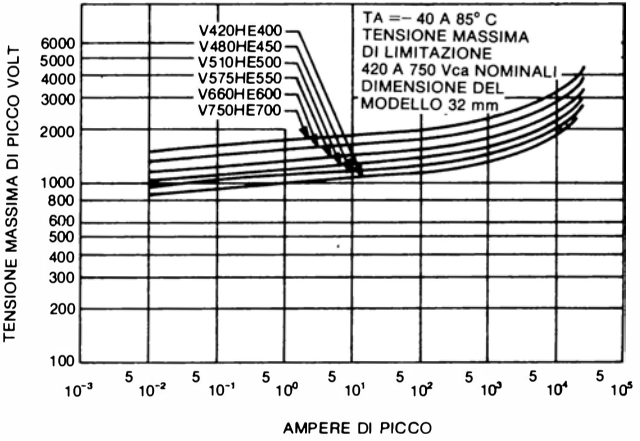
CARATTERISTICHE V-I AL TRANSITORIO





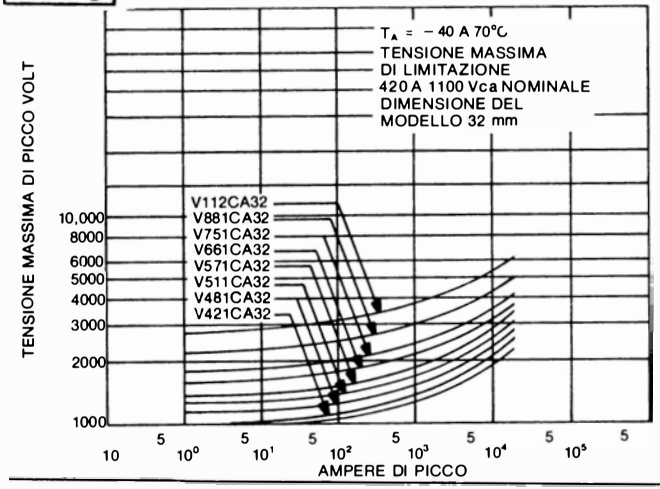
SERIE HE

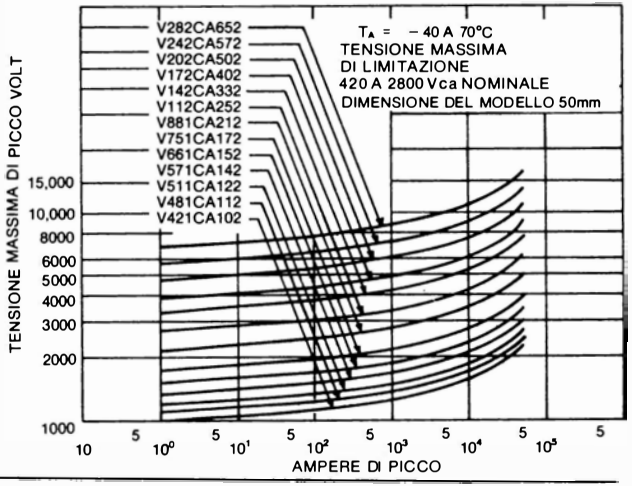




CARATTERISTICHE V-I AL TRANSITORIO:

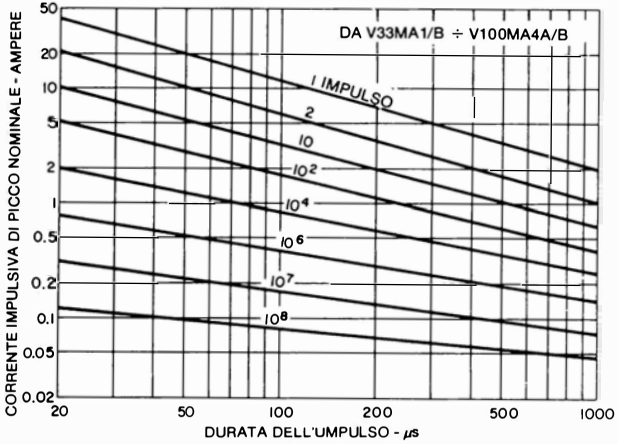
SERIE C

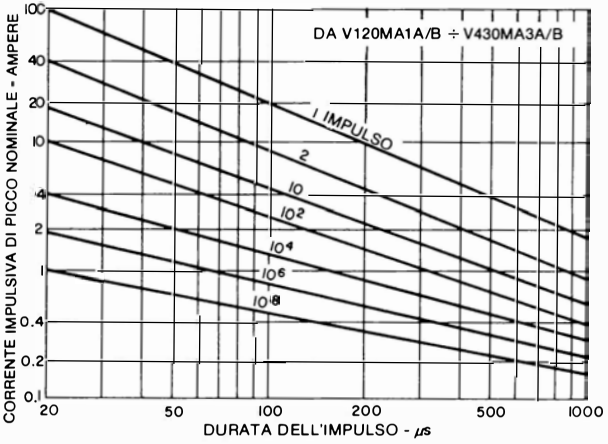




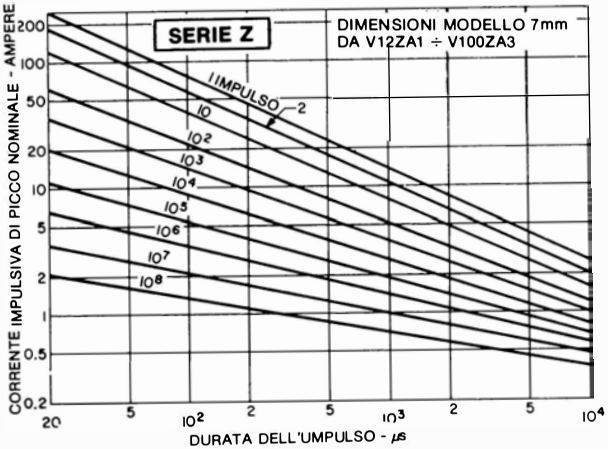
SERIE MA

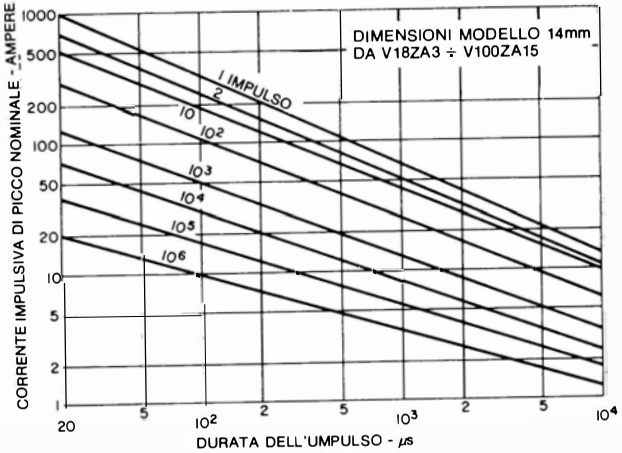
DURATA A REGIME IMPULSIVO

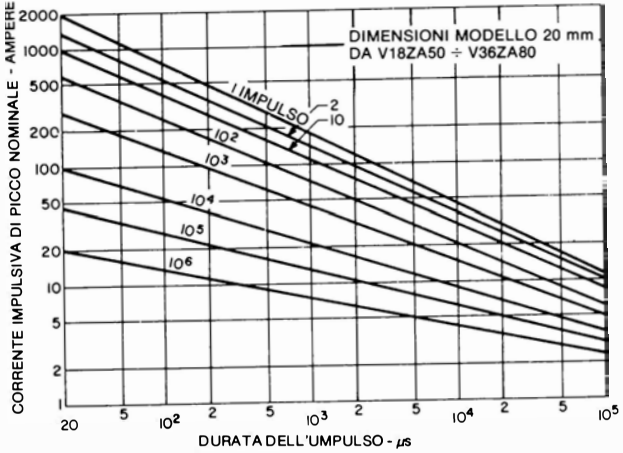




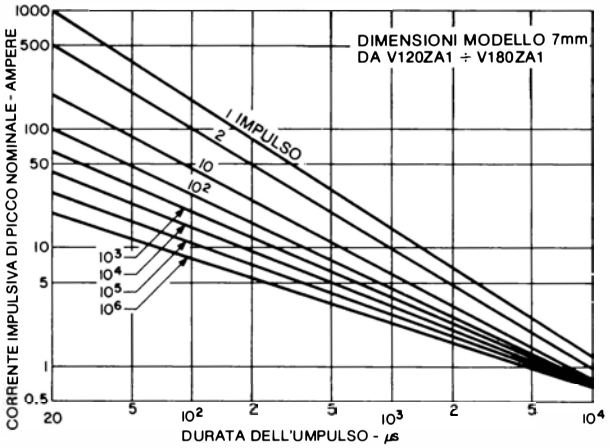
DURATA E REGIME IMPULSIVO

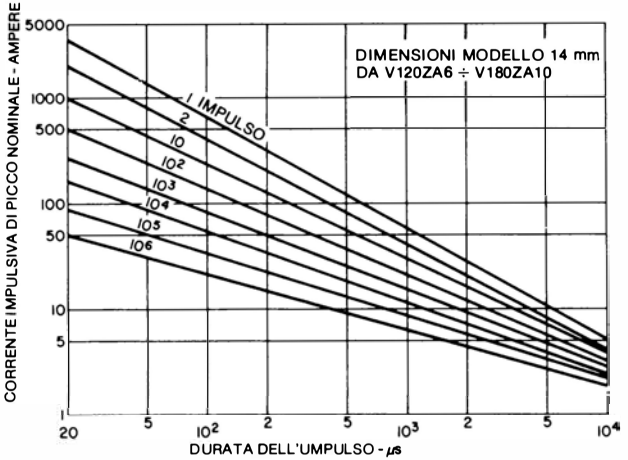






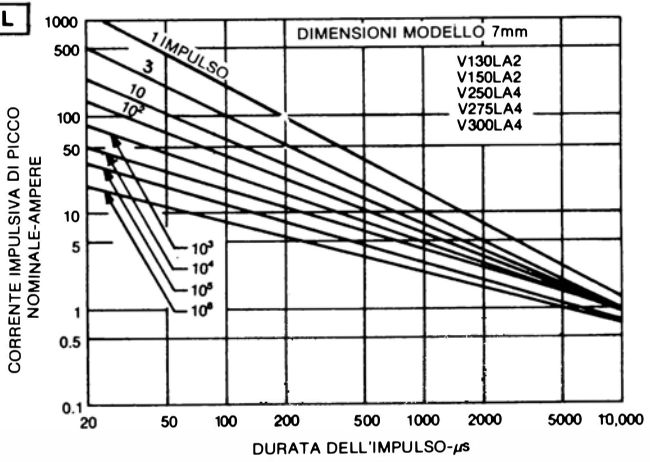
Continuo serie Z

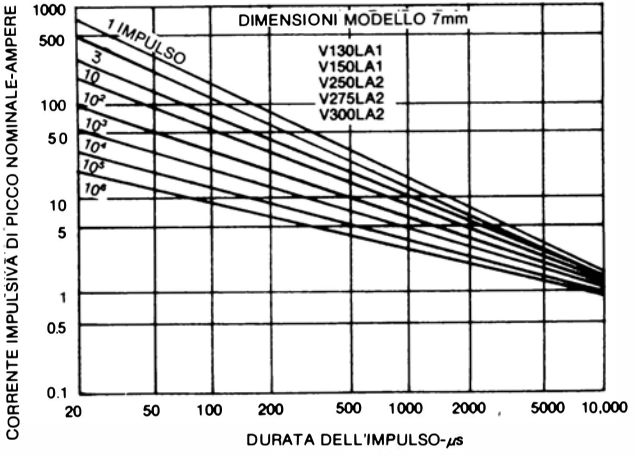




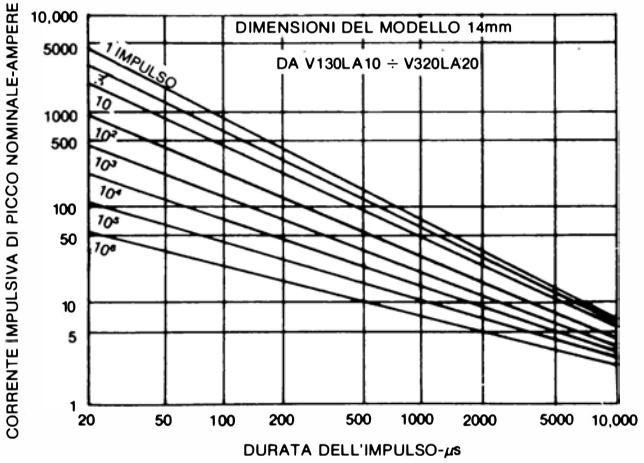
Nota: Viene definita fine della durata uile, una degradazione che avviene quando il componente mostra una deriva nella tensione del varistor ad 1 mA, che superi il ± 10% del valore iniziale. Questo tipo di guasto deriva di solito da una diminuzione del valore V_1 ma non impedisce l'ulteriore funzionamento del componente. Però il varistor non corrisponderà più ai dati originali. Nota: per i modelli V24ZA50, V27ZA60, V33ZA70 e V36ZA80 la corrente di prova applicabile è di 10 mA.

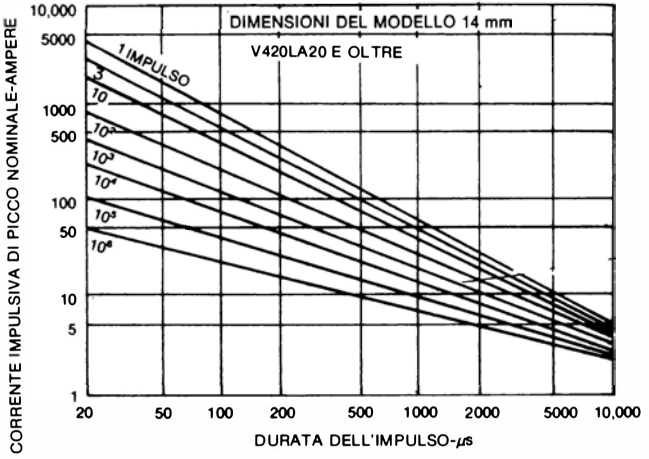
SERIE L

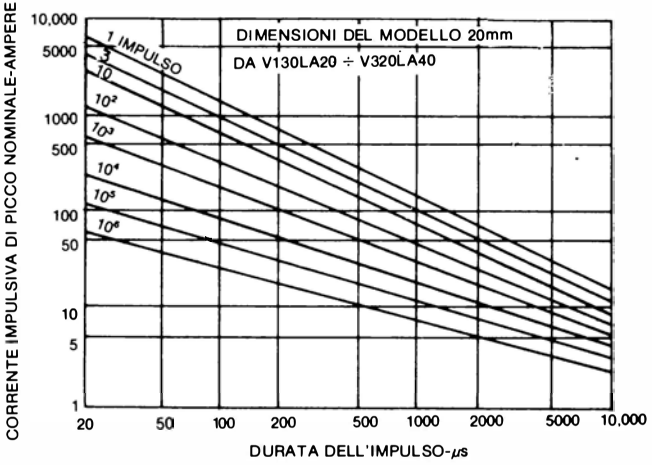


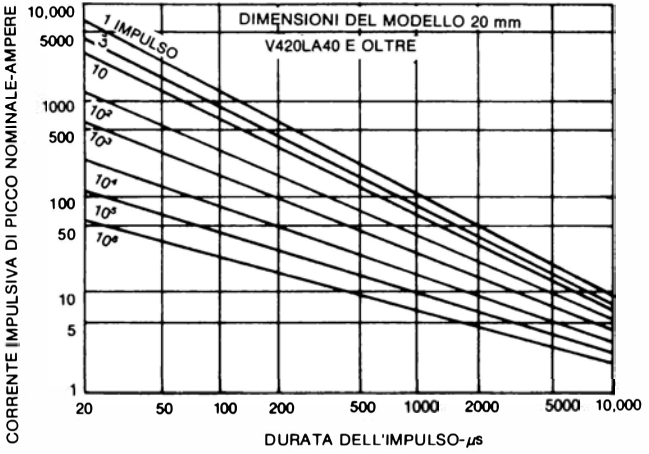


Continuo Serie L



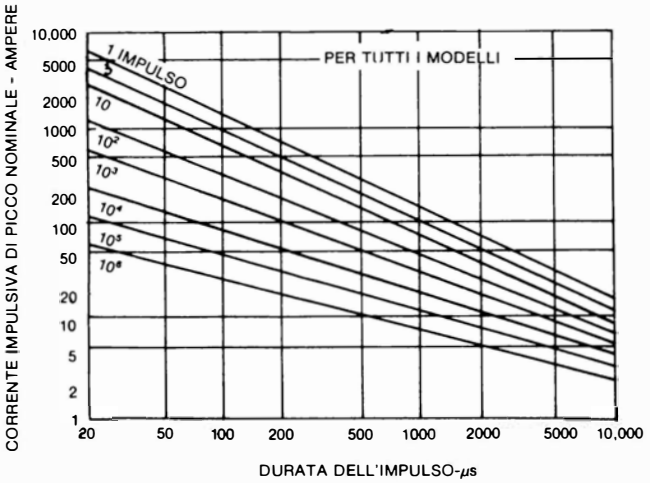




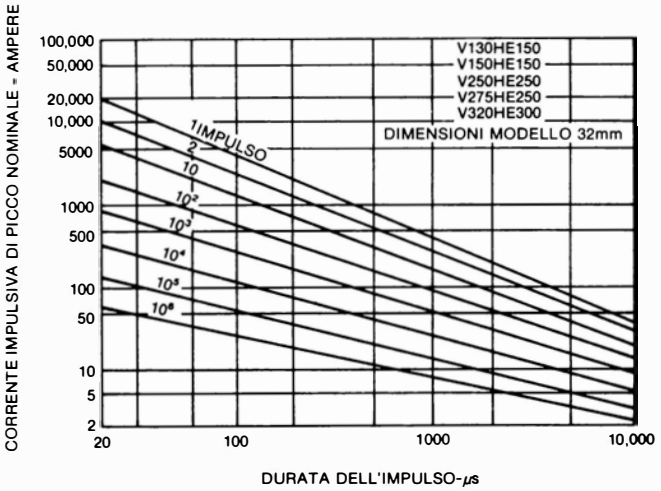


DURATA A REGIME IMPULSIVO

SERIE P

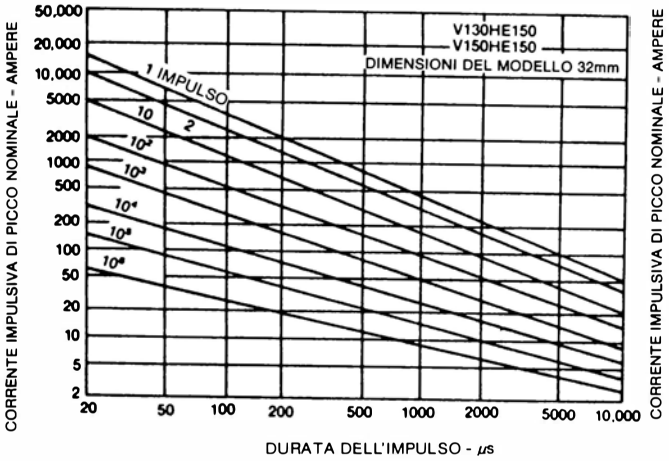


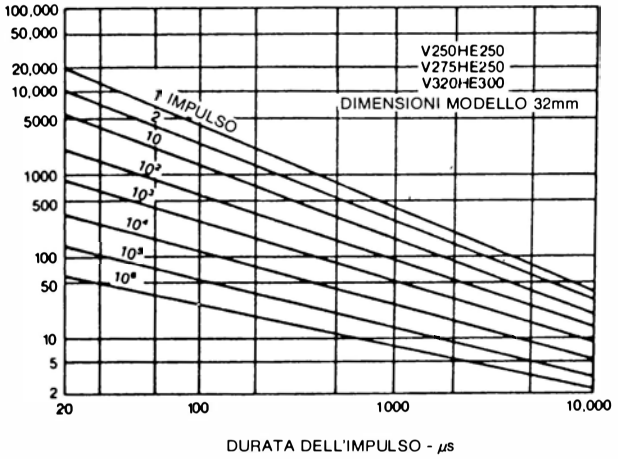
SERIE HE

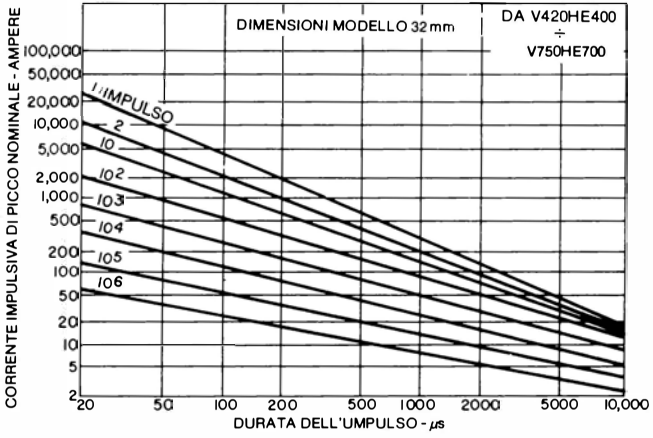


Nota: Viene definita fine della durata utile una degradazione che avviene quando il componente mostra una deriva della tensione del varistor ad 1 mA che superi il ± 10% del valore iniziale. Questo tipo di guasto deriva di solito da una diminuzione del valore V1, ma non impedisce l'ulteriore funzionamento del componente. Però il varistor non corrisponderà più ai dati originali.

Continuo Serie HE



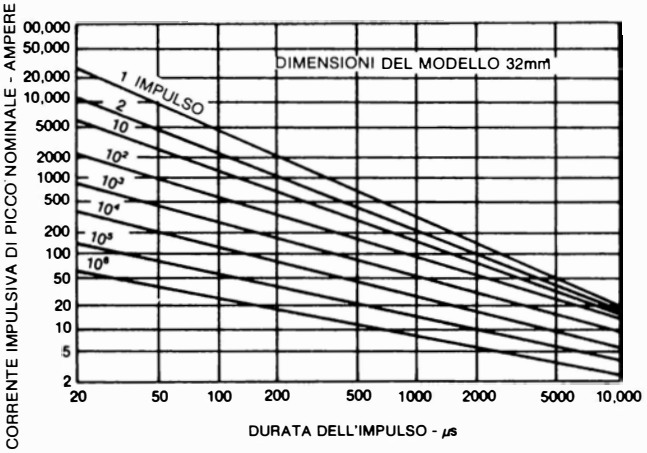


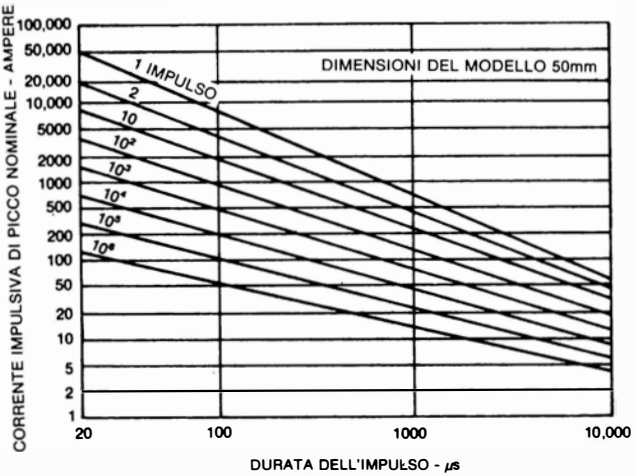


Nota: Viene definita fine della durata utile una degradazione che avviene quando il componente mostra una deriva della tensione del varistor ad 1 mA che superi il ± 10% del valore iniziale. Questo tipo di guasto deriva di solito da una diminuzione del valore V1, ma non impedisce l'ulteriore funzionamento del componente. Però il varistor non corrisponderà più ai dati originali.

DURATA REGIME IMPULSIVO:

SERIE C



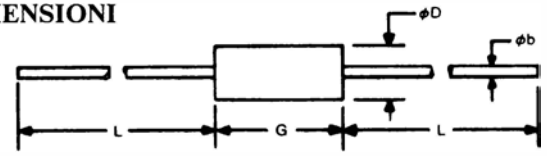


Nota: Viene definita fine della durata utile una degradazione che avviene quando il componente mostra una deriva della tensione del varistor ad 1 mA che superi il ± 10% del valore iniziale. Questo tipo di guasto deriva di solito da una diminuzione del valore V1, ma non impedisce l'ulteriore funzionamento del componente. Però il varistor non corrisponderà più ai dati originali.

Varistori ad ossido metallico GE-MOV® II per la protezione contro i transitori di tensione

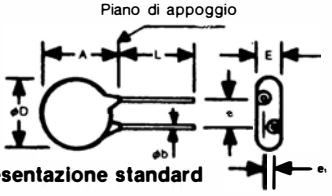
FORME E DIMENSIONI

SERIE MA



SIMBOLO	MILLIMETRI		POLLICI	
	MIN.	MAX.	MIN.	MAX
Φb	.60	.83	0.024	.033
ΦD	3.43	3.68	.135	.145
G	8.01	8.50	.315	.335
L	26.0	29.0	1.03	1.14

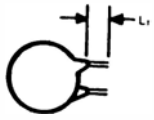
SERIE Z ed L



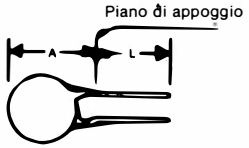
Presentazione standard

TERMINALI STANDARD TAGLIATI	DIMENSIONI DEL MODELLO DI VARISTOR					
	7mm		14mm		20mm	
	mm	in	mm	in	mm	in
A MAX.	11.7	0.46	18.9	0.74	25.5	1.01
Φb MAX.	0.68	0.027				
Φb MIN.	0.59	0.023				
ΦD MAX.	10.0	0.39	16.4	0.65	22.5	0.89
e MAX.	8.5	0.33				
e MIN.	4.0	0.16				
L MIN.	25.4	1.00	25.4	1.00	25.4	1.00

DIMENSIONI ESTERNE NOMINALI	TENSIONE MASSIMA EFFICACE DEL VARISTOR $V_{m(ca)}$									
	V12ZA-V56ZA		V68ZA V160ZA		V120ZA-V180ZA V130LA-V150LA		V250LA-V575LA		V1000LA	
	mm	in	mm	in	mm	in	mm	in	mm	in
e_1 MAX.	3.8	0.15	5.5	0.22	3.8	0.15	5.5	0.22	9.0	0.35
e_1 MIN.	1.1	0.04	3.0	0.12	1.1	0.04	3.0	0.12	6.0	0.24
E MAX.	5.6	0.22	7.3	0.29	5.6	0.22	7.3	0.29	10.8	0.43



Terminali standard tagliati

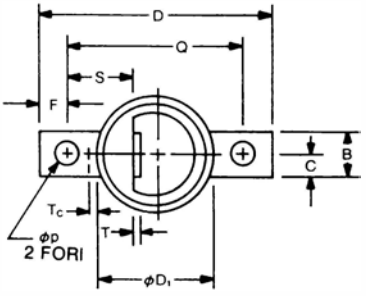


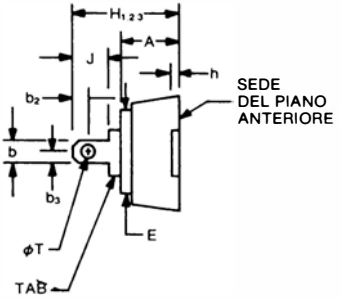
Terminali crimpati

Terminali crimpati e tagliati

VARIANTI DISPONIBILI	DIMENSIONI DEL MODELLO DI VARISTOR					
	7mm		14mm		20mm	
	mm	in	mm	in	mm	in
Tarature L_T MAX.	4.8	0.19	4.8	0.19	4.8	1.9
Tarature L_T MIN.	3.4	0.13	3.4	0.13	3.4	0.13
Crimpati A MAX.	15.0	0.59	22.5	0.89	29.0	1.14

SERIE P

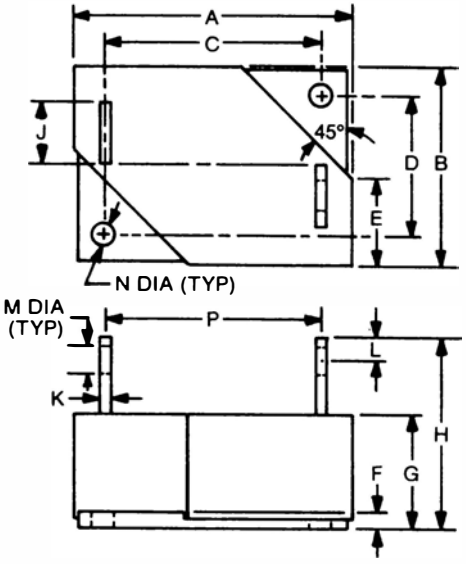




Simbolo	Pollici			Millimetri			Note
	MIN.	NOM.	MAX.	MIN.	NOM.	MAX.	
A			.57			14.3	
b			.26			6.6	1
b_2		.16			4.1		
b_3		.13			3.2		
B			.51			12.9	
C			.26			6.5	
D			2.61			66.2	
ΦD_1			1.32			33.5	
E		.44			11.2		
F		.30			7.7		
h		.03	.04		.8	.9	
H_1	.91		1.01	23.2		25.5	3
H_2	.96		1.12	24.6		28.3	3
H_3	1.03		1.29	26.3		32.6	3
J			.32			8.1	
Φp	.22		.24	5.8		6.0	
Q	1.99	2.00	2.01	50.6	50.8	51.0	
S		.76			19.2		
T			0.4			1.0	
ΦT	.11			2.8			
Tc		.13			3.2		2

Note:
1. La piastra è progettata per accogliere il terminale ad innesto rapido da 1/4".
2. La temperatura del contenitore è misurata a T_c sulla superficie superiore della piastra di base
3. H_1 (componenti a 130-150 V_{eff})
   H_2 (componenti a 250-320 V_{eff})
   H_3 (componenti a 420-660 V_{eff})
4. Connessioni elettriche: terminale superiore e piastra di base.

SERIE HE



Dimensione	Millimetri	Pollici
A	61 MAX.	2.40 MAX.
B	41. MAX.	1.60 MAX.
C	44.45 ± .75	1.75 ± .03
D	25.40 ± .75	1.00 ± .03
E	16.5 NOM.	.65 NOM.
F	3.2 NOM.	.13 NOM.
G	23 MAX.	.91 MAX.
H	41 MAX.	1.60 MAX.
J	13 NOM.	.51 NOM.
K	1.6 NOM.	.06 NOM.
L	6.4 NOM.	.25 NOM.
M	6.4 NOM.	.25 NOM.
N	5.4 NOM.	.21 NOM.
P	40.5 NOM.	1.6 NOM.

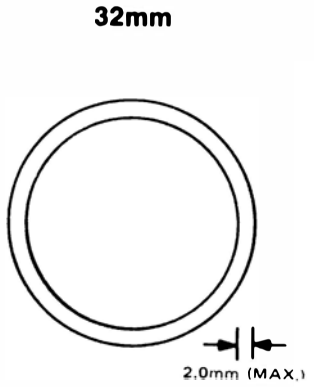
Peso massimo ..... 120 gm.
Distanza di scarica minima
Da terminale a terminale ..... 1,4 in. (3.5 cm.)
Da terminale a piastra base ..... 0.80 in. (2.0 cm.)

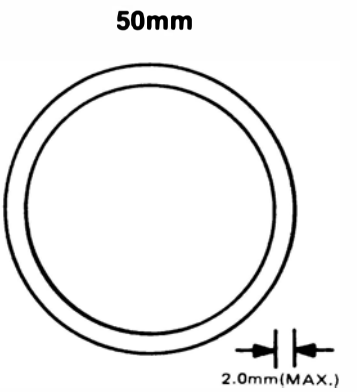
SERIE C

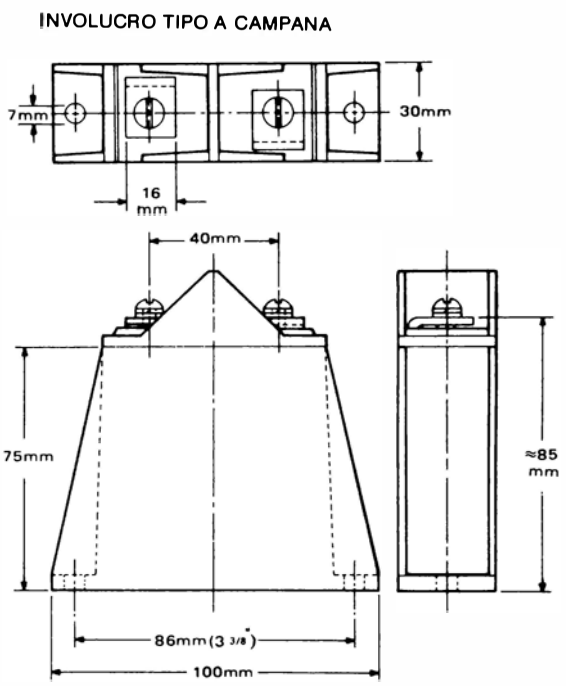
SPESSORE DEL DISCO - W								
VACM	Modelli da 32 mm				Modelli da 50 mm			
(RMS)	mm		Pollici		mm		Pollici	
VOLTS	MIN.	MAX.	MIN.	MAX.	MIN.	MAX.	MIN.	MAX.
420	3.9	5.9	0.15	0.23	3.9	5.9	0.15	0.23
480	4.3	6.5	0.17	0.26	4.3	6.5	0.17	0.26
510	4.8	7.2	0.19	0.28	4.8	7.2	0.19	0.28
575	5.2	7.9	0.20	0.31	5.2	7.9	0.20	0.31
660	6.1	9.2	0.24	0.36	6.1	9.2	0.24	0.36
750	7.0	10.4	0.28	0.41	7.0	10.4	0.28	0.41
880	8.4	13.0	0.33	0.51	8.4	13.0	0.33	0.51
1100	10.5	16.3	0.41	0.64	10.5	16.3	0.41	0.64
1400	—	—	—	—	13.1	20.2	0.52	0.80
1700	—	—	—	—	16.3	23.9	0.64	0.94
2000	—	—	—	—	19.3	28.7	0.76	1.13
2400	—	—	—	—	22.8	33.9	0.90	1.33
2800	—	—	—	—	27.5	40.8	1.08	1.60

* Per ulteriori informazioni e numeri di modello, contattare la Fabbrica.

SERIE C

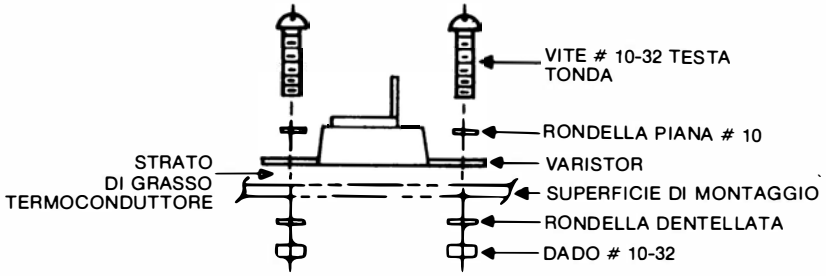

32mm
2.0mm (MAX.)
32mm±2mm
W


50mm
2.0mm(MAX.)
50mm±3mm
W

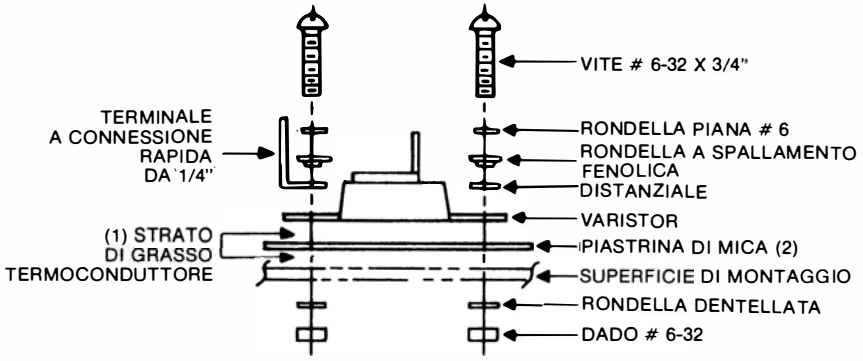

INVOLUCRO TIPO A CAMPANA
7mm
30mm
16
mm
40mm
75mm
≈85
mm
86mm(3 3/8")
100mm

MONTAGGIO DEI VARISTORI SERIE P

MONTAGGIO TIPICO NON ISOLATO



MONTAGGIO TIPICO ISOLATO



NOTE:

1. Si raccomanda il grasso termoconduttore GE G623, oppure i DC3, 4, 340 o 640 della Dow Corning.
2. I kit di isolamento a 1000 V contengono i seguenti elementi, e possono essere ordinati con la sigla N7811055.
   (1) Isolamento in MICA da 1" x 3,1" x 0,005" di spessore
   (2) Viti # 6-32 x 3/4 vite
   (2) Rondelle piane # 6
   (2) Rondelle a spallamento fenoliche
   (2) Rondelle elastiche e dentellatura interna # 6
   (2) Dadi # 6-32
   (1) Terminale per connessione rapida da 1/4"
   (1) Distanziale

SIGLE SPECIALI DEI PRODOTTI

La marcatura dei varistori GE-MOV®II comprende un codice completo per il numero di modello e dati. A causa delle limitate dimensioni, tutti i tipi radiali da 7 mm sono marcati con una sigla abbreviata come risulta dalle tabelle seguenti.

SERIE L

Numero modello	Sigla
V130LA1	1301
V130LA2	1302
V150LA1	1501
V150LA2	1502
V250LA1	2502
V250LA4	2504
V275LA2	2752
V300LA2	3002
V300LA4	3004

SERIE Z

Numero modello	Sigla
V12ZA1	12Z1
V18ZA1	18Z1
V22ZA1	22Z1
V27ZA1	272A
V33ZA1	33Z1
V39ZA1	39Z1
V47ZA1	47Z1
V56ZA2	56Z2
V68ZA2	68Z2
V82ZA2	82Z2
V100ZA3	100Z
V120ZA1	120Z
V150ZA1	150Z
V180ZA1	180Z

L. 12.000 Cod. 611A ISBN 88-7056-112-7

I circuiti elettromeccanici e quelli facenti uso di tubi a vuoto erano poco soggetti a danneggiamenti dovuti a transitori di alta tensione. Con l'aumento dell'impiego dei dispositivi a stato solido, la necessità di protezione contro i sovraccarichi di tensione, dovuti a disturbi atmosferici ed altro, è diventata sempre più rigorosa. I metodi di soppressione tradizionali divennero in molti casi inadeguati, e se ne dovettero trovare di nuovi. Il libro si propone di dare un contributo fattivo alla risoluzione del problema, non solo analizzando da un punto di vista teorico le cause e gli effetti del fenomeno, ma anche dando concrete soluzioni circuitali utilizzanti le famiglie di varistori GE-MOV e GE-MOV II, resistenze ceramiche a caratteristica non lineare.

LA SOPPRESSIONE DEI TRANSITORI DI TENSIONE

GRUPPO EDITORIALE JACKSON